专栏：工作相关肌肉骨骼疾患
Special column: Work-related musculoskeletal disorders

工效学负荷评估方法进展概述

江南宇[1]，董一丹[1]，姜伟[2]，何丽华[1]

1. 北京大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系，北京 100191
2. 埃姆梯埃姆（上海）企业管理咨询有限公司，上海 200433

DOI 10.11836/JEOM22034

摘要：

工效学负荷是导致工作相关肌肉骨骼疾患（work-related musculoskeletal disorders, WMSDs）的重要原因之一，准确测量及评估工效学负荷水平并进行工效学干预对 WMSDs 的防控具有重要意义。工效学负荷可分为外部负荷和内部负荷，其评估方法包括主观判断法、系统观察法以及直接测量法。本文概述了基于肌骨动力学模型模拟与生物标志的内部负荷评估方法，介绍了工效学负荷评估工作系统整体设计的概念及其范例——人类工效学评估工作表（Ergonomic Assessment Worksheet, EAWS），并讨论了工效学负荷评估方法的自动化、智能化及复合化发展趋势与选用工效学负荷评估方法的考虑因素。

关键词：工效学负荷；工作相关肌肉骨骼疾患；肌骨动力学；生物标志；工作系统

Overview of advances in evaluation methods for ergonomic exposure JIANG Nanyu[1], DONG Yidan[1], JIANG Wei[2], HE Lihua[1] (1. Department of Occupational and Environmental Health, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China; 2. MTM (Shanghai) Enterprise Management Consulting Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract:

Ergonomic exposure is one of the important causes of work-related musculoskeletal disorders (WMSDs). Accurate measurement and evaluation of ergonomic exposure level and implementation of ergonomic intervention are of great significance to the prevention and control of WMSDs. Ergonomic exposure can be divided into external exposure and internal exposure, and its evaluation methods include subjective judgment method, systematic observation method, and direct measurement method. This paper summarized the internal exposure assessment methods based on musculoskeletal dynamics and biomarkers, introduced the overall design concept of ergonomic exposure assessment system, used the Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS) as an example, and discussed the development trend of automation, intelligence, and compounding of ergonomic exposure assessment methods and the factors considered in the selection of ergonomic exposure assessment methods.

Keywords: ergonomic exposure; work-related musculoskeletal disorders; musculoskeletal dynamics; biomarker; work system

工作相关肌肉骨骼疾患（work-related musculoskeletal disorders, WMSDs）是由于个体暴露于职业场所中各类不良工效学因素中产生的肌肉、神经、肌腱、关节、软骨和椎间盘等的损伤疾病，主要包括下背痛和颈肩腕综合征等[1]。WMSDs 的致病过程不同于传统的法定职业病，通常是心理、生理及职业工效学等多种因素共同作用的结果[2–4]，严重影响作业人员的身心健康与工作效率，也造成了很大的经济负担，目前已经成为职业卫生领域的重要问题之一[5–6]。

在发达国家，作业人员有 1/3 的病假源于不良的人体工效学设计等所导致的肌肉骨骼疾患和失调[7]。研究证明，工作中的姿势负荷和力量负荷等工效学负荷是反映 WMSDs 发生危险水平的重要因素[8]。工效学负荷评估涉及生物力学、生理学以及心理学等诸多领域，其核心在于生物力学水平上的评估，但其他方面因素在负荷评估中也同样不容忽视。作业人员承受的负荷水平及其影响并不只取决于工作性质，也与其执行相关工作的具体方法高度相关。通过生物力

组稿专家
何丽华（北京大学公共卫生学院），E-mail：alihe2009@126.com

基金项目
基础加强计划技术领域基金项目（2020-JCJQ-JJ-238）

作者简介
江南宇（1999—），男，硕士生；
E-mail：jnypku@foxmail.com

通信作者
何丽华，E-mail：alihe2009@126.com

伦理审批 不需要
利益冲突 无申报
收稿日期 2022-01-26
录用日期 2022-04-19

文章编号 2095-9982(2022)06-0632-07
中图分类号 R13
文献标志码 A

▸引用
江南宇，董一丹，姜伟，等. 工效学负荷评估方法进展概述 [J]. 环境与职业医学，2022，39(6)：632-638.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM22034

Funding
This study was funded.

Correspondence to
HE Lihua, E-mail: alihe2009@126.com

Ethics approval Not required
Competing interests None declared
Received 2022-01-26
Accepted 2022-04-19

▸ To cite
JIANG Nanyu, DONG Yidan, JIANG Wei, et al. Overview of advances in evaluation methods for ergonomic exposure[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(6): 632-638.

▸ Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM22034

学等分析方法对人体在搬运、抬举重物等各种作业姿势下的负荷水平进行评估是保证工人负荷处于合理水平、预防 WMSDs 的重要手段，正确评估工效学负荷危险并给出针对性改进措施有利于降低事故发生率，提高工作效率并减少工作导致的损伤。

根据 Winkel 和 Mathiassen 的理论[9]，工效学负荷可分为外部负荷和内部负荷，可由三个维度表示，即水平、持续时间和频率，在已有的负荷评估实践中也包含了姿势变化、移动速率、振动及社会心理因素等其他维度。Van Dijk 等[10]、Westgaard 等[11]则提出了解释工作环境等复杂负荷因素对人体健康影响的工效学负荷模型（图 1）。在该模型中，工作环境、作业姿势、负荷强度、工作组织等在工作过程中干扰人的生理或心理状态的外部条件总和被称为外部负荷，而内部负荷是外部负荷作用于作业人员身体内部所产生的系统、组织、细胞和分子水平的急性效应，如肌肉活动导致血液循环增加、局部肌肉疲劳以及包括电化学和新陈代谢变化在内的各种生理及生化反应。短期的内部负荷代表工作期间和之后几个小时的工作量所带来的影响，在恢复不充分的情况下，短期影响可能扩大到长期，产生 WMSDs、运动能力退行性疾病或慢性疲劳等不良症状。

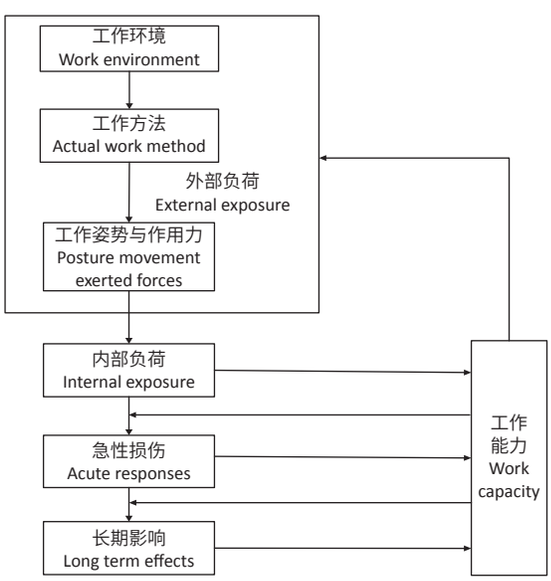

图 1 工效学负荷模型[11]

Figure 1 Model of ergonomic exposure[11]

1 工效学负荷评估方法分类

工效学负荷评估方法大体可分为主观判断法、系统观察法和直接测量法三类，每种方法都有对应的两种评估方式：主观判断法采取访谈及问卷调查方式，可由被调查者本人进行自评，也可以通过专家进行评估；系统观察法可分为在作业场所直接测量的简单观察法以及通过录像回放甚至图像识别等技术进行深入分析的先进观察法；直接测量法可以在工作场所使用仪器直接测量，也可以在实验室进行工作模拟分析。

1.1 主观判断法

在三类方法中，主观判断法最为简便高效，是分析 WMSDs 的常用方法。随着科技的发展，其调查方式也由纸笔记录逐渐转变为使用网络问卷或专家通过工作现场视频进行研究[12]。主观判断法主要针对 WMSDs 症状或疲劳等主观因素相关问题收集数据，多数采用多分类量表方式，部分问卷还添加了测评部位的图解以增加方法的准确性，评价方法较为灵活。但是主观判断法主观性较强，需要研究人员具备丰富的专业知识以发现和解释数据背后的问题[13]，且问卷的填写质量也会受被调查者文化水平和认知能力影响，在绝对定量方面存在缺陷[14]。较为典型的是北欧肌肉骨骼调查问卷（Nordic Musculoskeletal Questionnaire, NMQ），该问卷属于症状描述类问卷，使用便捷快速、应用广泛，但无法获取 WMSDs 危险因素信息。针对中国职业人群实际情况，董一丹等[15]借鉴 NMQ 等问卷设计了中国肌肉骨骼疾患问卷（Chinese Musculoskeletal Questionnaire, CMQ），在国内实践信效度较好，但应用较少，仍需修订与完善。

1.2 系统观察法

系统观察法可大体分为简单观察法和先进观察法两种评估方式。简单观察法即人工对工效学危害因素进行系统观察记录，适用于重复性、标准化作业的评价，应用范围较为广泛，种类也较多，该方法可以针对作业个人乃至全体岗位进行工效学负荷评估。简单观察法与主观判断法均可在涉及水平和频率的负荷评估时实现较为简单便捷的评估，然而简单观察法在负荷评估中的作用时间评估方面误差较大，部分方法仅能研究机体个别部位，故其更适用于重复性作业评价，而对于较为复杂、形式不固定的作业难以取得准确、一致的评价结果。具有代表性的简单观察法是工作姿势分析（Ovako Working Posture Analysis System, OWAS），其在恒定或不定间隔内采集作业信息，并用等级编码为作业时颈部、腰部等部位姿势与负重情况及可能造成的 WMSDs 危险程度划分等级。而先进观察法主要采用图像识别等信息技术对动态作业信息进行捕捉评价。随着机器学习技术的成熟，基于深度卷积神经网络及深度相机等图像识别技术的先进观

察法不断推出。

1.3 直接测量法

直接测量法是通过三维运动和声、光、电磁、肌电信号等先进传感器直接测量出作业人员的姿势、运动及多部位负荷情况，并结合计算机系统进行实时分析的方法。该方法可以快速、直接、准确地定量分析工效学负荷水平，在实际研究尤其是内部负荷测量方面具有很大优势。直接测量法的缺点在于作业人员佩戴的传感器可能引起其作业动作等姿态的改变，设备投入和人员操作技术水平等客观条件的限制也会影响直接测量法在工效学现场干预的发挥。当作业现场不满足直接测量法的评估条件时，一般采用两阶段法，即第一阶段通过主观判断法或系统观察法得到初步信息后，于负荷评估第二阶段构造相对完善的三维生物力学模型，进行实验室模拟测量。国际上较为经典的直接测量法应用举例见表 1。

表 1 国际上较为经典的直接测量法应用举例

Table 1 International representative examples of application of the direct measurement methods

技术方法 Technical method	主要特征 Main characteristics	用途 Application
光扫描系统[16] Optical scanning system	利用扫描单元监测特定解剖位置 Monitor specific anatomical locations using scanning units	监测标志物的移动 Monitor marker movement
声系统[17] Acoustic system	利用转化器分析接收器声信号 Analyze acoustic signals of receivers by converters	测量位移、速度和加速度 Measure displacement, velocity, and acceleration
腰部运动监测系统[18] Lumbar motion monitoring system	记录三维位置、速度和加速度 Record three-dimensional position, velocity, and acceleration	监测躯干运动状态 Monitor trunk movement
电磁系统[19] Electromagnetic system	利用接收器进行脉冲电磁场信号追踪 Track pulse electromagnetic field signals using receivers	测量躯体位置、角度及运动方向 Measure body position, angle, and movement direction
加速度测量系统[20] Acceleration measurement system	运动状态、姿势的连续测量 Continuously measure motion states and postures	区分动、静态运动状态 Distinguish between dynamic and static motion states
肌电描记技术[21] Electromyography	分析肌电信号的频谱特征 Analyze the spectrum characteristics of electromyography signals	评估肌肉负荷情况及疲劳程度 Assess muscle exposure and fatigue

2 内部负荷的测量与评估

内部负荷是外部负荷作用于作业人员身体内部所产生的一系列生理及生化反应，其测量一般以直接测量法为主，主观判断法和系统观察法为辅，主要包括人体肌骨动力学模型模拟、侵入式生物标志和非侵入式生物标志等测量方法。

2.1 人体肌骨动力学模型模拟

通过人体肌骨动力学模型分析内部负荷主要采用先进观察法，辅以直接测量法。人体肌肉骨骼系统包括骨骼、骨骼肌以及关节连接，研究人员一般将人体简化为依靠关节连接的多柔体力学系统，通过深入探讨外部负荷、时变肌肉内力、腹内压、关节力矩及其动力学影响解释人体运动系统神经-肌肉控制以及肌肉驱动、承载与做功机制，使此类方法在工效学内部负荷评估中发挥巨大作用。

在 20 世纪 90 年代，力学界在人体肌骨多体动力学建模中仅将骨骼简化为刚体，将骨骼肌用 Hill-Zajac 模型描述，而将韧带、软骨等连接辅助结构简化为超弹性体，采取非线性弹簧建模方式，实现了肌骨动力学模型与解剖特征的对应[22–23]。随着信息技术的进步，力学及工效学研究人员不断创新开发出生物力学建模软件，其中最具代表性的是斯坦福大学建立的 OpenSim 全人体模型，该模型还可以通过外接 C++开发插件或编辑模型 xml 文件添加模块的方式实现腹内压的模拟建模[24]。但此类模型大多是西方研究机构根据本国解剖数据建立的模型，其参数无法有效代表中国人肌骨系统特点[25]。以先进观察法观测支撑的肌骨动力学模型也可以同 Xsens 等直接测量法传感器相结合，监测肌肉内力、腹内压等生物力学信息，实现内部负荷的智能化评估[26]。

2.2 生物标志

生物标志（biomarker）是一类能客观测量与评价生物过程、病理过程或对药物干预作出反应的指示，可用于对机体的诊断、监测或危险评估[27]。

2.2.1 侵入式生物标志之生化指标测量 生物标志可对内部负荷进行检测和危险预警，为干预措施实施提供时间，减少 WMSDs 的发生。侵入式生物标志大多来自人体血液、尿液及体液等，可分为能量代谢标志、氧化应激标志及炎症生物标志，研究人员一般通过相关生化指标对内部负荷水平进行评估。

（1）能量代谢标志。人体组织在作业的疲劳和损伤状态下产生的代谢产物可作为内部负荷的重要生物标志，如乳酸（lactic acid, LA）、乳酸脱氢酶（lactate dehydrogenase, LDH）、血氨、肌酸激酶等。LA 是无氧呼吸的产物之一，其水平通常随着运动强度增加而增加，与内部负荷和肌肉疲劳程度呈正比，当作业强度超过一定量后，LA 含量呈指数级增长[28]；需要注意的是，一些生物代谢物如 LDH 的增高对于单一组织或器官并无特异性，故在负荷评估实践中一般将 LDH 与 LA、Ca^{2+}指标联合应用以评价内部负荷水平。

（2）氧化应激标志。活性氧（reactive oxygen species, ROS）是运动诱导产生的一类氧的单电子还原产物；动态负荷、静态负荷及其损伤均可引起 ROS 的增加，从而引起 WMSDs。氧化应激一般在运动刚结束后较为剧烈[29]，随着 ROS 的增加，脂质过氧化、蛋白质氧化和核酸氧化过程也会加剧发生，相关标志的生化指标如硫代巴比妥酸反应物、蛋白质羟基化合物、谷胱甘肽、过氧化氢酶等迅速增加[30]。

（3）炎症生物标志。除能量代谢与 ROS 氧化应激外，炎症反应也是引起 WMSDs 的重要因素，在肌肉骨骼疾患损伤的过程中，由损伤肌肉释放细胞因子，诱导全身炎性细胞向其移动，从而使全身处于抗炎症状态[31]；炎症生物标志主要是分解代谢的生物标志及细胞免疫应答的炎症细胞因子，包括 C 反应蛋白、白细胞、白细胞介素-6、前列腺素 E2、可溶性 E-选择素、肿瘤坏死因子 α 等。

2.2.2 非侵入式生物标志之生理指标测量　相较于简单观察法及系统观察法的测定，直接测量法获得的生理数据更易量化内部负荷，说服力较高，常用的非侵入式生物标志主要包括肌电描记技术（electromyography, EMG）信号、脑电（electroencephalogram, EEG）指标、心电（electrocardiogram, ECG）指标、眼动等生理指标。

以 EMG、EEG、ECG 为代表的电生理生物标志具有实时性、无损伤性、客观性的优点，可以较为准确地测量内部负荷水平、持续时间及频率三个维度的数据。Yan 等[32]通过分析注视、扫视、瞳孔直径等眼动指标构建神经网络模型预测工效学负荷，发现眼动指标对负荷预测准确，为后续智能评估系统开发奠定了基础。此外，基于 ECG 的心率指标得到的心率变异性的低频、高频等频域指标可以一定程度上表现内部负荷的变化情况[33]。近期，科研人员提出最大摄氧量（maximal oxygen uptake, VO_2max）也是用于评估内部负荷的良好生理参数[34]。

3 负荷评估方法的发展趋势

3.1 基于工作系统整体设计理念的负荷评估：评估方法自动化

在生产实践中，作业人员往往面临着作业轮换等复杂的周期性工作任务，如果仅凭单一的负荷评估方法如提举公式[35]对身体特定部位进行评估，不仅在实际操作中较为不便，往往还会忽略所评估部位与其他部位 WMSDs 发生危险的关联性。理想的负荷评估不仅应考虑特定部位内部及外部工效学负荷评估与干预，还应在工作系统设计初期从个体、组织乃至社会等多层次的综合危险因素出发，对工效学负荷及 WMSDs 发生危险整体情况进行较为精确的估计，以提供便捷的预防性工效学指导。

工作系统是为了完成工作任务，在所设定的条件下，由工作环境、工作空间和工作过程中共同起作用的一个或多个人和工作设备组合而成的系统[36]。工作系统整体设计的含义即在设计过程中考虑单个或多个工作者和工作系统的其他要素（如工作任务、设备、工作环境等）之间的相互作用，将多种评估方法整合为可以快速获得作业人员的整体负荷水平和具体部位负荷水平映射的自动化评估系统；研究人员一般将作业人员看作所设计工作系统中不可分割的部分，通过整合后的研究方法获得作业人员 WMSDs 总体危险情况及具体危险部位的数据，实现生产过程中的宏观尺寸和工具位置等工作系统要素的优化设计，从而进一步通过从技术性工作系统整体设计到组织性和社会性工作系统整体设计，充分保障作业人群的人格与健康。

根据评估目标，针对特定工作场所作业人员的工效学负荷量化评估方法可分为两级评估水平：一级水平采用工作系统整体设计进行总体危险预警评估；而二级水平的目的在于针对特定部位的负荷进行详细评估与分析，一般带有指数类型的计算分析，在危险存在的可能性已经通过一级水平评估方法探测到的情况下，可以应用二级水平方法进行深入分析（图 2）。

作为秉承工作系统整体设计理念的代表，人类工效学评估工作表（Ergonomic Assessment Worksheet, EAWS）是由达姆施塔特工业大学人类工效学研究院开发并被广泛应用于制造业、航空航天及国防等领域的负荷评估一级水平方法，其前身是针对汽车制造业研发的汽车装配工作表（Automotive Assembly Worksheet, AAWS）[37]。EAWS 可以探究作用力、频率、抓握等不良工效学因素及工效学负荷与 WMSDs 关系，并能作为一个完整的系统对工效学负荷进行危险评估。

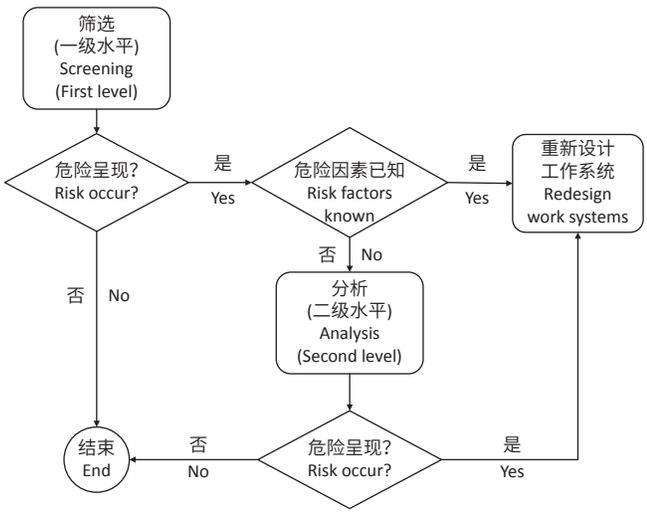

图 2 工作系统整体设计分析流程图

Figure 2 Flow chart of overall design of work systems

EAWS 用于分析的基本结构是表格形成的工作表，在每个部分都参考了较为成熟的二级水平负荷评估方法，可以分为四个部分：第一部分至第三部分以生理学和生物力学标准为基础进行评估，而第四部分以医学和流行病学数据为基础。对于不同的评估方法，第一部分至第三部分的结果被合并为“全身”负荷，而第四部分则显示“上肢”的负荷情况。四个部分均涵盖一个特定的危险领域：带较小外力的身体姿势、行动作用力、手动搬运操作和在重复性任务中的上肢负荷，每部分负荷危险都会被量化赋值，故其也可用作二级水平方法对负荷危险进行深入讨论。

EAWS 的主要贡献在于上肢重复性任务负荷评估部分。该部分包含工作内容和工效学负荷危险水平的相关信息，可以最大限度地减少负荷评估中的应用程序偏差，并在各种工作场所提供客观、一致的分析。作为采用工作系统整体设计理念的负荷评估方法代表，EAWS 可在生产模式及过程开发模式两种不同的模式使用：在生产模式下，EAWS 作为负荷评估一级水平方法可以快速提供作业人员的整体危险评估；在过程开发模式下，分析人员可通过输入工作系统中的宏观尺寸、产品位置、作用力等特征数据，对工作系统整体进行前瞻性的工效学负荷危险评估和要素的优化设计。EAWS/AAWS 对国际标准的兼容性及每部分对应的二级水平方法见表 2。

表 2 EAWS/AAWS 对国际标准的兼容性及每部分对应的二级水平方法

Table 2 Compatibility of EAWS/AAWS with international standards and corresponding second-level method of each part

危险负荷 Risky exposure	标准(Standard)		方法(Method)		
	欧洲标准化委员会 Comité Européen de Normalisation (CEN)	国际标准化组织 International Organization for Standardization (ISO)	相互关联单一系统 (二级水平方法) Interconnected single system (Second-level method)	组合系统(一级水平方法) Combined system (First-level method)	
带较小外力的身体姿势(静态负荷) Posture with less external force (Static exposure)	1005-4	11226	工作姿势分析 Ovako Working Posture Analysis System (OWAS)	AAWS	EAWS
行动作用力 Action force	1005-3	11228-2	快速上肢评估 Rapid Upper Limb Assessment (RULA)	AAWS	EAWS
手动搬运操作 Manual handling operation	1005-2	11228-1	提举公式 NIOSH lifting equation	AAWS	EAWS
在重复性任务中的上肢负荷 Upper limb exposure in repetitive tasks	1005-5	11228-3	职业重复性活动检查表 Occupational Repetitive Action (OCRA) 压力指数 Strain Index 手部活动水平阈值 The ACGIH TLV for Hand Activity Level	–	EAWS

3.2 基于计算机视觉与机器学习的负荷评估：评估方法智能化

信息技术是工效学负荷评估方法进步和创新的重要力量：主观判断法由纸笔记录逐渐转变为使用网络问卷；系统观察法中人工现场识别的简单观察法已逐渐被图像识别支持下精度更高的人体骨架预测方法等先进观察法代替，将先进观察法与直接测量法结合运用的工效学负荷的自动识别与危险评估也已成为跨学科研究的主流方向。

基于深度学习的机器学习算法可通过大量训练样本自主学习强判断力特征，目前此类算法已被广泛应用于计算机视觉的人体骨架预测领域，以服务于工效学负荷评估，该法主要通过检测手臂、关节等部位活动对作业姿势及运动轨迹进行预测。Manghisi 等[38]

基于.NET 框架下的 Windows Kinect 平台开发了 RULA 的整体评估系统 K2-RULA。该系统可通过 Kinect 相机同时获取作业姿势 RGB 彩色图像与深度图像，并借助随机森林算法结合肢体角度等数据从图像中预测骨架节点的三维坐标，评估作业人员在每个实时瞬间的负荷情况，且支持录像数据保存进行后续分析，该系统在各领域实践中被证实具有较好的评估得分精度[39]。随着人体骨架预测技术的发展，评估方法采用的算法从最初的随机森林等分类或回归模型转变为树形空间结构模型，从而提高了骨架节点之间关联性和预测精度；Abobakr 等[40]提出了基于级联神经网络的无须人体骨架节点进行分析的负荷评估整体设计，实现对作业姿势高准确预测。

3.3 基于内部负荷系统化评估体系的负荷评估：评估方法复合化

随着分子生物学及信息技术的发展，生物标志的研究使负荷评估拓展到电生理学、分子流行病学、分子毒理学、基因组学以及高通量测序技术等前沿领域，更多可靠的内部负荷评估的生物标志被验证并被更充分利用到作业人员 WMSDs 致病机制与防控研究中。

尽管生物标志评估指标具有准确、客观、定量的特点，且内部负荷与生物标志水平之间存在重要关联，但仍存在下述问题：①WMSDs 是职业活动中由多种因素引起的多发性常见疾病，同时涉及多个组织、器官及系统，不同类别生物标志通常共存并相互影响，但其损伤机制尚未有明确定论，目前仍缺乏灵敏、特异的生物标志指标；②当前作业人员工作流程趋于复杂化，生物标志在不同特征人群中的指标可能因人而异；③对整体水平进行响应的生物标志能否用于局部负荷，及其是否具有组织特异性还不清楚；④定量描述内部负荷的生物标志有待进一步探索，内部负荷及 WMSDs 之间的因果关系仍需进一步证明。

到目前为止，尽管非侵入式生物标志逐渐被应用于负荷评估实践，以 LA 为代表的侵入式生物标志仍是目前应用最为广泛的标志物，对特定作业人群内部负荷评估的最适合的生物标志组合及其具有评价意义的指标参考范围仍待确定[41]。比起单个生物标志，目前的趋势是建立多类复合生物标志指标（代谢状态、肌肉状态、炎症状态等）的内部负荷系统化评估体系，以更充分反映内部负荷状态，提高评估的敏感性与特异性。随着生物大数据技术的不断发展，蛋白质组学、基因测序、代谢组学等新技术不断应用于生物标志开发，VO_2max 等具有实时反馈、无创、便携、对机能状态变化具有高敏感性和反应性等特点的新生物代谢物指标陆续被发现，为内部负荷系统化评估体系的建立和工作系统整体设计理念的实现提供了有力支撑。

4 结论与展望

不同工效学负荷评估方法各有特点，故制定评估方案应考虑具体个案评估的性质与目的，对研究对象（群体或个体）的负荷水平、持续时间和频率等主要评估维度以及技术设备的准确性、可靠性与费用等诸多因素进行综合考量和分析。

工效学负荷评估方法革新的要点在于对其他领域新技术的不断借鉴与结合。在职业工效学与健康愈发受到重视的当下，将工作系统整体设计的思想同深度学习、图像识别、生物信息学等技术深入结合的工效学负荷自动识别与危险评估系统已成为跨学科研究的主流。然而复杂作业过程的 WMSDs 危险评估存在人工智能难以自动化评估的参数，完美评估内部负荷的解决方案也尚待探讨；后续的研究聚焦于将主观、客观评估方法相结合，进一步推进工效学负荷评估方法向自动化、智能化及复合化趋势演变，解决现有负荷评估整体设计在复杂作业环境下对症评估的精度问题，实现满足基本评估需求的可靠性及对特定问题进行深入调查的可行性的兼顾。

参考文献

[1] 王富江, 张忠彬, 何丽华. 我国职业工效学研究历程和进展[J]. 工业卫生与职业病, 2019, 45(6): 485-488.
WANG FJ, ZHANG ZB, HE LH. Research progress and advance on occupational ergonomics of China[J]. Ind Health Occup Dis, 2019, 45(6): 485-488.

[2] BONGERS PM, WINTER CR, KOMPIER MA, et al. Psychosocial factors at work and musculoskeletal disease[J]. Scand J Work Environ Health, 1993, 19(5): 297-312.

[3] DEVEREUX JJ, BUCKLE PW, VLACHONIKOLIS IG. Interactions between physical and psychosocial risk factors at work increase the risk of back disorders: an epidemiological approach[J]. Occup Environ Med, 1999, 56(5): 343-353.

[4] ARMSTRONG TJ, BUCKLE P, FINE LJ, et al. A conceptual model for work-related neck and upper-limb musculoskeletal disorders[J]. Scand J Work Environ Health, 1993, 19(2): 73-84.

[5] GRAVES RJ, WAY K, RILEY D, et al. Development of risk filter and risk assessment worksheets for HSE guidance—'Upper Limb Disorders in the Workplace' 2002[J]. Appl Ergon, 2004, 35(5): 475-484.

[6] CHOI SD. A study of trade-specific occupational ergonomics considerations in the U. S. construction industry[J]. Work, 2012, 42(2): 215-222.

[7] SCHAUB K, CARAGNANO G, BRITZKE B, et al. The European assembly worksheet[J]. Theor Issues Ergon Sci, 2013, 14(6): 616-639.

[8] 袁志伟, 唐仕川, 王生, 等. 工效学负荷评价方法研究进展[J]. 环境与职业医学, 2015, 32(9): 887-891.

YUAN Z W, TANG S C, WANG S, et al. Research advance on evaluation methods for ergonomic exposure[J]. J Environ Occup Med, 2015, 32(9): 887-891.

[9] WINKEL J Ø, MATHIASSEN S E. Assessment of physical work load in epidemiologic studies: concepts, issues and operational considerations[J]. Ergonomics, 1994, 37(6): 979-988.

[10] VAN DIJK F J H, VAN DORMOLEN M, KOMPIER M A J, et al. Herwaardering model belasting-belastbaarheid[J]. T Soc Gezondheidsz, 1990, 68: 3-10.

[11] WESTGAARD R H, WINKEL J. Guidelines for occupational musculoskeletal load as a basis for intervention: a critical review[J]. Appl Ergon, 1996, 27(2): 79-88.

[12] KADEFORS R, FORSMAN M. Ergonomic evaluation of complex work: a participative approach employing video –computer interaction, exemplified in a study of order picking[J]. Int J Ind Ergon, 2000, 25(4): 435-445.

[13] LI G, BUCKLE P. Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods[J]. Ergonomics, 1999, 42(5): 674-695.

[14] DAVID G C. Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders[J]. Occup Med (Lond), 2005, 55(3): 190-199.

[15] 董一丹, 娜扎开提·买买提, 王富江, 等. 中国肌肉骨骼疾患问卷编制与验证——附调查问卷[J]. 中国职业医学, 2020, 47(1): 8-18.
DONG Y D, MAMAT N, WANG F J, et al. Establishment and verification of the Chinese Musculoskeletal Questionnaire —The questionnaire is attached in the attachment[J]. China Occup Med, 2020, 47(1): 8-18.

[16] PEARCY M J, GILL J M, HINDLE R J, et al. Measurement of human back movements in three dimensions by opto-electronic devices[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 1987, 2(4): 199-204.

[17] HSIAO H, MONROE KEYSERLING W. A three-dimensional ultrasonic system for posture measurement[J]. Ergonomics, 1990, 33(9): 1089-1114.

[18] MARRAS W S, FATHALLAH F A, MILLER R J, et al. Accuracy of a three-dimensional lumbar motion monitor for recording dynamic trunk motion characteristics[J]. Int J Ind Ergon, 1992, 9(1): 75-87.

[19] SLOBOUNOV S M, SIMON R, SEBASTIANELLI W, et al. Application of scientific instrumentation in a clinical setting[J]. J Sport Rehabil, 1996, 5(3): 251-261.

[20] TULEN J H M, BUSSMANN H B J, VAN STEENIS H G J, et al. A novel tool to quantify physical activities: ambulatory accelerometry in psychopharmacology[J]. J Clin Psychopharmacol, 1997, 17(3): 202-207.

[21] WELLS R, NORMAN R, NEUMANN P, et al. Assessment of physical work load in epidemiologic studies: common measurement metrics for exposure assessment[J]. Ergonomics, 1997, 40(1): 51-61.

[22] ZAJAC F E. Muscle and tendon: Properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control[J]. Crit Rev Biomed Eng, 1989, 17(4): 359-411.

[23] BLANKEVOORT L, KUIPER J H, HUISKES R, et al. Articular contact in a three-dimensional model of the knee[J]. J Biomech, 1991, 24(11): 1019-1031.

[24] SETH A, HICKS J L, UCHIDA T K, et al. OpenSim: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement[J]. PLoS Comput Biol, 2018, 14(7): e1006223.

[25] LU Y, MEI Q, PENG H T, et al. A comparative study on loadings of the lower extremity during deep squat in Asian and Caucasian individuals via OpenSim musculoskeletal modelling[J]. BioMed Res Int, 2020, 2020: 7531719.

[26] KARATSIDIS A, JUNG M SCHEPERS H M, et al. Musculoskeletal model-based inverse dynamic analysis under ambulatory conditions using inertial motion capture[J]. Med Eng Phys, 2019, 65: 68-77.

[27] Biomarkers Definitions Working Group. Biomarkers and surrogate endpoints: preferred definitions and conceptual framework[J]. Clin Pharmacol Ther, 2001, 69(3): 89-95.

[28] SCHUBACK K, ESSÉN -GUSTAVSSON B, PERSSON S G B. Incremental treadmill exercise until onset of fatigue and its relationship to metabolic response and locomotion pattern[J]. Equine Vet J, 1999, 31(S30): 337-341.

[29] RAINOLDI A, GAZZONI M, MERLETTI R, et al. Mechanical and EMG responses of the vastus lateralis and changes in biochemical variables to isokinetic exercise in endurance and power athletes[J]. J Sports Sci, 2008, 26(3): 321-331.

[30] MRAKIC-SPOSTA S, GUSSONI M, VEZZOLI A, et al. Acute effects of triathlon race on oxidative stress biomarkers[J]. Oxid Med Cell Longev, 2020, 2020: 3062807.

[31] BRANDT C, PEDERSEN B K. The role of exercise-induced myokines in muscle homeostasis and the defense against chronic diseases[J]. BioMed Res Int, 2010, 2010: 520258.

[32] YAN S, WEI Y, TRAN C C. Evaluation and prediction mental workload in user interface of maritime operations using eye response[J]. Int J Ind Ergon, 2019, 71: 117-127.

[33] NORTH R A, GRAFFUNDER K. Evaluation of a pilot workload metric for simulated VTOL landing tasks[J]. Proc Hum Factors Soc Annu Meet, 1979, 23(1): 357-361.

[34] 侯言旭, 姜礼杰, 胡保华, 等. 基于边际谱熵的肌肉疲劳实时评估方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1625-1633.
HOU Y X, JIANG L J, HU B H, et al. Real-time assessment of muscle fatigue based on marginal spectrum entropy[J]. Chin J Sci Instrum, 2017, 38(7): 1625-1633.

[35] WATERS T R, PUTZ-ANDERSON V, GARG A, et al. Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks[J]. Ergonomics, 1993, 36(7): 749-776.

[36] 工作系统设计的人类工效学原则: GB/T 16251—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Ergonomic principles in the design of work systems: GB/T 16251—2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.

[37] WINTER G, SCHAUB K, LANDAU K, et al. Development and validation of ergonomic screening-tools for assembly lines[C]//Proceedings the 16 th World Congress on Ergonomics. Maastricht: IEA, 2006: 10-14.

[38] MANGHISI V M, UVA A E, FIORENTINO M, et al. Real time RULA assessment using Kinect v2 sensor[J]. Appl Ergon, 2017, 65: 481-491.

[39] GONZÁLEZ A, HAYASHIBE M, BONNET V, et al. Whole body center of mass estimation with portable sensors: using the statically equivalent serial chain and a Kinect[J]. Sensors, 2014, 14(9): 16955-16971.

[40] ABOBAKR A, NAHAVANDI D, HOSSNY M, et al. RGB-D ergonomic assessment system of adopted working postures[J]. Appl Ergon, 2019, 80: 75-88.

[41] FINSTERER J. Biomarkers of peripheral muscle fatigue during exercise[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2012, 13: 218.

(英文编辑：汪源; **责任编辑**：顾心怡, 丁瑾瑜)