

计算机化神经认知评估系统研究综述



张政霖^{1,2} 张利伟¹ 王文娟^{2,3} 夏莉¹ 符豪^{1,2} 王宏志¹
杨立状¹ 李海¹

1 中国科学院合肥物质科学研究院医学物理与技术中心 合肥 230031

2 中国科学技术大学 合肥 230026

3 安徽农业大学理学院 合肥 230036

(zzl1124@mail.ustc.edu.cn)

摘要 神经及精神类疾病、外科损伤、肿瘤以及衰老会导致人类神经认知功能减退。干预和康复需要专业的神经认知评估工具来确定认知受损情况、跟踪认知变化。为了推进适合中国人群的计算机化神经认知评估系统的研发,提高中国认知神经心理学的临床应用水平,首先,对神经认知评估的研究背景与发展历史进行了概述;其次,调查研究了国内外近 10 年间有论文或临床数据支撑其信效度的计算机化神经认知评估系统,对比了各自的特点;接着,论证了开发适用于中国人的计算机化神经认知评估系统的必要性,并初步介绍了其开发流程,提出将计算机自适应测试策略用于评估系统;然后,分析了目前计算机化的神经认知评估系统所面临的主要问题,并在此基础上,展望了虚拟现实、脑认知计算模型和在线评估等现代信息技术在未来计算机化神经认知评估系统中的应用;最后,提出了基于人工智能医疗、移动医疗和数字医疗等的计算机化神经认知评估系统的商业化模式。

关键词: 计算机化神经认知评估系统;神经心理学;信效度;计算机自适应测试;虚拟现实;商业化

中图法分类号 TP391

Survey on Computerized Neurocognitive Assessment System

ZHANG Zheng-lin^{1,2}, ZHANG Li-wei¹, WANG Wen-juan^{2,3}, XIA Li¹, FU Hao^{1,2}, WANG Hong-zhi¹, YANG Li-zhuang¹ and LI Hai¹

1 Center of Medical Physics and Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3 School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

Abstract Neurological and psychiatric disorders, surgical injuries, tumors, and aging can lead to neurocognitive decline in humans. Intervention and rehabilitation require specialized neurocognitive assessment tools to evaluate cognitive decline and track cognitive changes. In order to promote the research and development of computerized neurocognitive assessment system suitable for Chinese population and improve the clinical application level of cognitive neuropsychology in China, firstly, the research background and development history of neurocognitive assessment were summarized. Secondly, the computerized neurocognitive assessment system with empirical evidences supporting its reliability and validity over the past decade at home and abroad was investigated and its characteristics were compared. Then, this paper demonstrated the necessity of developing a computerized neurocognitive assessment system suitable for Chinese people, introduced its development process and put forward the computer adaptive testing strategy for the assessment system. Subsequently, the main problems of the current computerized neurocognitive assessment system were analyzed. On this basis, the application of modern information technology such as virtual reality, brain cognitive computing model and online assessment in the future computerized neurocognitive assessment system was prospected. Finally, a commercial model of computerized neurocognitive assessment system based on artificial intelligence, mobile medicine and digital medicine was proposed.

收稿日期: 2019-01-18 返修日期: 2019-03-11 本文已加入开放科学计划(OSID), 请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目: 国家自然科学基金(81401483, 31500917, 81571653); 安徽省自然科学基金(1708085MF141); 合肥市对外合作项目(ZR201801020002); 安徽省重点研究与开发计划(201904a07020104); 中国科学院合肥肿瘤医院院长基金(YZJJ2019C14, YZJJ2019A04)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (81401483, 31500917, 81571653), Natural Science Fund of Anhui Province (1708085MF141), Hefei Foreign Cooperation Project (ZR201801020002), Key R&D Program of Anhui Province (201904a07020104) and Director's Fund of Hefei Cancer Hospital of CAS (YZJJ2019C14, YZJJ2019A04).

通信作者: 李海(hli@cmpt.ac.cn)

Keywords Computerized neurocognitive assessment system, Neuropsychology, Reliability and validity, Computerized adaptive test, Virtual reality, Commercialization

1 引言

神经及精神类疾病、外科损伤、肿瘤以及衰老会导致人类神经认知功能减退。随着老龄化社会的来临,神经认知功能减退将成为躯体疾病因素以外影响人们生活幸福感和满意度的重要因素。未来,面向认知功能的康复训练有巨大的市场。认知康复方案的推进依赖于对神经认知功能的准确评估,包括注意力、记忆力、言语能力、执行功能、视空间知觉、精神行为以及日常生活能力等各个方面。近年来,神经认知评估逐渐由以往的纸笔量表测试和操作测试转变为计算机化评估。

美国临床神经心理学学会与美国神经心理学会在其联合意见书中^[1],将“计算机化神经认知评估设备”定义为任何使用计算机、数字平板电脑、手持设备或其他数字接口,而不是由人类测试员来管理、评分或解释与神经健康和疾病问题相关的大脑功能和相关因素的测试仪器,同时指出计算机化神经认知功能评估具备迅速测试大量个体、随时评估、精确测量反应时间、评估时间短、费用低、易于不同语言管理、自动数据导出、无需专业人员参与以及自动解释与决策等优点。

2 神经认知功能评估的发展历史

20 世纪 50 年代以来,神经认知功能评估的发展大致可以划分为 4 个阶段。

1)神经认知评估 1.0 时代(1950—1980 年):神经认知评估的早期工作是采用实验心理学方法对颅脑损伤病人的认知缺陷模式进行分析,以推测认知功能的神经生物基础。1973 年苏联心理学家鲁利亚发表的《神经心理学原理》是这一时期神经心理学的集大成者。1955 年出版的韦氏成人智力量表是此阶段神经认知功能评估系统的代表。

2)神经认知评估 2.0 时代(1980—2000 年):经典心理测量理论的完善提供了心理测验编制的规范化流程,催生了大量神经心理学测验。这些神经心理学测验是此阶段神经认知评估的主要手段,如 1983 年发布的 Boston 命名测验和 20 世纪 80 年代以来不断修订的韦氏智力量表。计算机技术的飞速发展也对此时的神经心理评估产生了重大影响,计算机辅助施测,甚至是计算机化评估开始出现,比如用于评估运动脑震荡的 CNS Vital Signs 系统。

3)神经认知评估 3.0 时代(2000 年至今):21 世纪以来,以项目反应理论为代表的现代心理测量理论蓬勃兴起,信息与计算机技术突飞猛进。许多专业的心理测评公司或者大型的神经心理学研究机构都开始将认知心理学的实验任务融入计算机化神经认知评估系统,并建立标准化的常模数据。比如,起源于 20 世纪 80 年代的 CANTAB 评估系统,以及 2012 年发布的 NIH Toolbox,都被广泛应用于临床领域。一些新兴技术,如虚拟现实技术和传感器技术,也开始在面向军事^[2]及体育领域^[3]的神经认知评估中崭露头角。

目前神经认知评估正在向 4.0 阶段发展,发展趋势如下。

首先,智能化神经认知评估系统是发展方向。评估系统不仅可以通过自适应策略调整测试难度以准确评估受测者的认知水平,而且能够智能选择题目和任务,聚焦受测者的特定受损认知领域。其次,虚拟和增强现实技术将改变传统的神经认知评估模式,通过技术手段实现了测试环境和流程的标准化,并能够在根本上解决认知功能评估的生态效度问题。然后,突破传统依赖正确性的分数解释,基于神经认知的计算模型对反应时间、准确率和生理指标进行综合评价,增加认知评估分析指标的维度和准确性,使得计算机语言和信息处理层次能够建立更精确的决策模型。最后,专家系统和神经网络的人工智能技术逐渐被运用到计算机化的神经认知评估系统中,提高了计算机在处理非线性数据和识别复杂模式的能力^[4]。

3 计算机化的神经认知评估系统

3.1 计算机化神经认知评估的优越性与重要性

首先,与传统的纸笔评估不同,计算机评估能够严格控制刺激的呈现,精确测量出受测者的反应时间^[5],而且区别于计算机引导或辅助评估,完全计算机化的评估不仅更易于管理,而且能够实现自我管理,甚至不需要专业的神经心理学人员参与。因此,计算机化的神经认知评估在使用和评分方面通常具有很高的客观性,减少了由于施测者主观因素带来的操作失误和记录偏差,提高了测验的标准化。

其次,计算机评估可以提供完全自动化的计算过程和结果显示,最终生成受测者的评估分析报告,同时将其存储在受测者的电子档案中,医生可以随时查看,这极大地简化了医生对患者的诊断过程。而且计算机化评估方法使得在对受测者进行评估时,能够很方便地同时对其进行脑电图分析,也可以同时应用于脑功能成像研究。

最后,采用技术手段提升评估的生态效度。传统神经认知评估的形式包括言语测验和操作测验,不论哪种形式,都是日常认知能力的一种抽象,与人们解决日常生活中的问题情境有较大差距。借助虚拟现实或增强现实技术,我们有望构造更为真实的问题情境,评估人们面对真实问题的能力表现^[6]。这对于儿童等特殊群体的认知功能评估有重要的意义。

3.2 常用的计算机化神经认知评估系统

计算机化神经认知评估系统有两种类型:传统神经心理学测验的计算机程序化和基于计算机技术特点的新测试。前者仅是测试形式和解释方式的计算机化^[7];后者则是源于认知心理学的计算机化实验任务,有认知心理学的理论和实验基础,能够捕捉一些不易通过纸笔评估发现的认知差异。本文主要关注后者的国内外研究进展,调研了近 10 年间国内外应用较为广泛的计算机化神经认知评估系统,如表 1 所列^[8-29]。每个神经认知评估系统往往根据其理论基础聚焦认知的某些侧面,表 2 比较了各个认知评估系统所关注的认知领域。

表 1 10 年间主要的计算机化神经认知评估系统

Table 1 Major computerized neurocognitive assessment systems over the past decade

特征 系统	用途	评估周期	评估平台	评估范围	评估人群	备注
CNB	实验	1h	Flash-based Web	9 个认知功能区	大学生	宾夕法尼亚大学 计算机神经认知评估
NIH Toolbox	商用、实验	2h	iPad, Web	认知、情感、运动和感觉	3~85 岁	美国国立卫生院 神经心理工具箱
CBB	商用	1h	Web	4 个认知领域	6~99 岁	Cogstate 简明测试集
CANTAB	商用	1.5h	Windows	核心认知、抑郁、 多动、痴呆症	正常人以及精神病患者	剑桥大学成套自动化 神经心理评估
MMPI-2	商用	40~50min	Windows	精神障碍、亚健康人群 和正常人的性格 特质分析	16~70 岁城市人口， 文化程度小学以上	明尼苏达 多项人格测验
VTs	商用	不定	Windows	多领域心理评估	各年龄段	维也纳 心理评估系统
CAB	商用	40 min	Web	基本认知功能、五大领域	6 岁以上	CogniFit 在线神经心理 认知评估系统
CAS-II	商用	15~30 min	Web	3 个一般功能区、 5 个主要认知区	12 岁以上	斯坦福大学认知障碍工具
Cogtest	商用	40~50 min	Web	六大认知领域	认知功能障碍人群	由黄金标准改编而成的 在线认知评估，识别和管理 认知功能障碍
IntegNeuro	商用	1 h	Windows	感觉运动、记忆、注意力、 语言、计划能力	6~96 岁	BRC 公司的对社会和 情绪认知的评估系统
BrainCare	商用	45~60min	Windows	七大认知领域	精神病患者	NeuroTrax 评估中风和 创伤性脑损伤后的 大脑健康

表 2 各个计算机化评估系统涉及的认知领域

Table 2 Cognitive domains involved in each computerized assessment system

认知领域 系统	注意力	适应性/ 灵活性	工作 记忆	文字 记忆	非文字 记忆	情景 记忆	语言表达/ 推理能力	视觉/ 空间能力	动作处理 速度	情绪 识别
CNB	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓	✓	✓	✓
NIH Toolbox	✓	—	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
CBB	✓	—	✓	—	—	—	—	✓	✓	—
CANTAB	✓	—	✓	✓	✓	—	✓	✓	✓	—
MMPI-2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VTs	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CAB	✓	—	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	—
CAS-II	✓	—	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—
Cogtest	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	✓	—
IntegNeuro	✓	—	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓
BrainCare	✓	—	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—
FePsy2.0	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓	✓	—
PsyTech	✓	—	✓	—	—	—	✓	✓	✓	—
NAFW, LAACS	✓	—	—	—	—	—	—	—	—	—
京师博仁	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—
CALCAP	✓	—	✓	—	—	—	✓	✓	—	—
TAP	✓	—	✓	—	—	—	—	✓	—	—
CDR	✓	—	✓	✓	✓	—	—	✓	✓	—
NeuroCog FX	✓	—	✓	✓	✓	—	✓	—	—	—

4 开发本土化评估系统的必要性

4.1 已有的计算机化认知功能评估系统的局限性

由表 1 可以看出,应用较为广泛的计算机化神经认知评估系统都是国外开发的,本文讨论其中 3 个较为典型的系统。

1)宾夕法尼亚大学的 CNB 评估系统能够评估抽象和思维灵活性、注意力、工作记忆、情景记忆、语言推理、空间处理、感觉运动、运动速度和情感识别九大认知领域。但是,该在线评估系统基于网页版的 Flash 技术,在未来缺乏技术维护和用户支持。除此此外,其验证样本多数为大学生,缺乏针对

具体人群的标准化常模。

2)NIH Toolbox 是一个多维的、简明的、免版税的评估系统,用于评估认知、感觉、运动和情感功能。它是一个 iPad 应用软件,但未在中国发行;免费版的 NIH 工具箱只有一些试用功能,不能够保存评估数据、生成报告和导出数据,用户必须每年支付 499.99 美元来获取以上权限;此外,尽管 NIH 工具箱在国外进行了大量研究,针对中国人群的信效度验证工作还未进行^[30]。

3)剑桥自动化成套神经心理评估系统 CANTAB,包括核心认知、抑郁症、多动症和痴呆症四大评估系统,22 个评估任

务^[31],内置常模数据库,涵盖4~90岁4个不同智力水平的超过2000个受测者样本数据。该系统已被广泛应用于学术研究、药物临床实验和医疗保健等领域。由于CANTAB中的任务都使用非语言刺激,对语言依赖程度低,可以避免不同语言背景对认知功能的影响,在国内也被广泛应用。相对于其他的系统,该系统有其订制的硬件设备,优点是保证了测试的标准化,缺点是限制了这一设备在床边测试、社区干预场景中的应用。另外,该系统的价格约为1250欧元,较为昂贵。

国内的计算机化评估系统还处于起步阶段。京师博仁公司的认知能力评估系统主要应用于教育领域,一般不用于临床认知功能障碍的评估和诊断。华东师范大学心理系开发的PsyTech心理实验教学系统,主要应用于实验心理学的课程教学,并不具备神经评估功能。

4.2 本土计算机化神经认知评估系统的开发流程

4.2.1 经典认知任务的吸纳和改造

计算机化的神经认知评估系统的开发不能脱离过去几十年神经心理学的理论和实践。有些测试任务经过漫长的筛选,已经被广泛使用^[30]。

目前已有的计算机化神经认知评估一般是对一些经典的纸笔范式和量表的程序化,而这些经典范式和量表都是经过大量临床实验验证的,甚至有些已成为评价新量表的“金标准”,因此我们在开发本土化的计算机评估系统时也可以参考经典的认知神经心理测量表,同时借鉴国外计算机化神经认知评估系统中的任务。在开发时可供参考的任务如表3所列。

表3 可供参考的评估任务

Table 3 Assessment tasks for reference

认知领域	参考来源	评估任务
记忆	1. Rey 听觉词语测验	1. 即时记忆任务
	2. 宾夕法尼亚大学 CNB 系统	2. 工作记忆和情景记忆任务
	3. 韦氏记忆量表	3. 逻辑记忆任务
语言	MoCA 量表	Boston 命名任务和词语流畅性任务
注意力	1. 韦氏智力量表	1. 数字广度测试和持续操作任务
	2. Cogstate 简明测试集	2. 颜色鉴别任务
视空间知觉	1. MMSE 中文版量表 2. CANTAB 系统	1. 按图示画图任务 2. MTS 任务
执行功能	1. CANTAB 系统 2. CWT 测验	1. 剑桥长林任务 2. Stroop 任务

4.2.2 计算机化自适应神经认知评估

目前,计算机化评估系统一般采用固定任务的方式,评估范式过于冗长,不具备针对性,效率较低。

基于项目反应理论的计算机自适应测试(Computerized Adaptive Test,CAT)可以获得项目(如难度水平)和受测者(如某一认知领域的水平)的特征估计,从而更有效地识别出适合每个个体的项目子集,这种测试方法被称为计算机自适应测试^[32]。

一方面,当受测者在某一认知任务中表现不佳时,CAT系统会提高对该类认知任务的敏感性,加大该类任务的权重,从而可以通过这种自适应匹配的方式检测出受测者特定的认知受损领域。另一方面,根据已经初步得到的特定认知受损领域以及受测者的作答情况,系统将会自动地从题库中抽取

与受测者能力相匹配的任务,达到任务与受测者水平的自适应^[33-34],通过这种迭代方式逐次逼近受测者在该受损认知领域的精确分值。

CAT系统能够呈现特定的刺激和收集特定的反应,缩短了评估时间,减少了任务数量,可以在不降低评估质量的情况下使任务数量减少50%~90%^[32,35]。因此,CAT系统比传统方法更为高效、准确和可靠。计算机化神经认知评估系统的开发流程如图1所示,最终的计算机化神经认知评估系统的组成框图如图2所示。

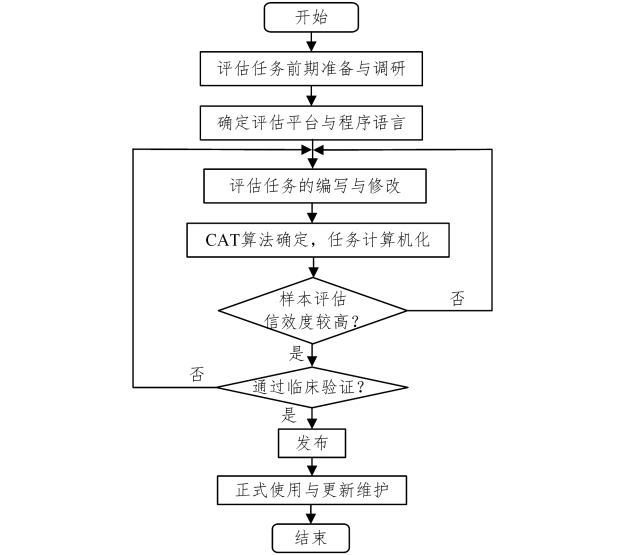


图1 计算机化神经认知评估系统的开发流程

Fig. 1 Development process of computerized neurocognitive assessment system

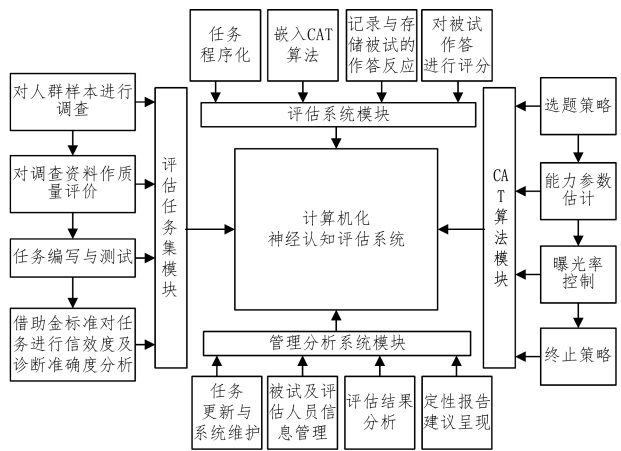


图2 计算机化神经认知评估系统组成框图

Fig. 2 Block diagram of computerized neurocognitive assessment system

5 发展趋势与商业化探讨

5.1 面临的主要问题与发展趋势

目前的主流计算机化神经认知评估存在以下几个主要问题。

1)生态效度有待提高。目前的计算机化神经评估系统没有智能,没有“温度”,无法像心理测验专家那样察言观色,无

法综合考虑受试者在测试时的状态和反应模式,给出专业的评估报告^[36]。另外,传统的计算机评估任务通常使用抽象刺激,任务普遍冗长单调,也会导致生态效度较低^[6]。

生态效度的发展趋势:未来可以将情绪识别技术应用于计算机神经认知评估,使得计算机在评估过程中可以实时识别出受测者的情绪变化并能做出相应的调整^[37]。此外,虚拟环境在临床神经认知评估中的生态效度方面有很大的应用潜力^[38],与传统的计算机神经认知评估系统相比,VR 可以通过逼真的虚拟环境提供功能性认知评估^[3],可以作为增强神经认知评估生态效度的有效手段^[2]。许多研究表明,使用 VR 技术作为神经认知评估工具的生态效度有所提高^[39-50]。基于 VR 的平台已经被证明可以增强现实条件下评估认知功能的多个领域的能力^[3],一方面,VR 评估场所可以在任何地方,为床边评估提供了可能性,方便评估无法移动的重症患者,提高了评估的适应性、真实性、互动性与准确性。另一方面,VR 评估系统也可以接入测量心率、皮肤电阻以及皮肤温度的设备,自动分析评价出受测者在评估过程中的各种生理反应及应激水平^[51]。未来的研究应更多地关注虚拟现实的预测效度,并探讨 VR 与传统评估的等效性或优越性。此外,也要考虑为基于 VR 的评估方式提供更规范和可靠的分析指标,如敏感性、特异性、阳性预测值和阴性预测值等^[52]。

2)结果分析有待完善。目前神经认知评估主要依赖于正确率指标,其计算并没有结合认知的计算模型。

分析指标的发展趋势:目前一些脑认知的计算模型已经取得了很大进展。基于计算模型,我们可以估计一些更加有理论意义的潜在指标,比如引入漂移扩散模型可以检测大脑活动和决策过程之间的关联,从而可以让研究人员研究心理决策过程的神经认知实现。

3)技术上的限制妨碍临床应用。医院台式电脑的使用正逐渐被淘汰,取而代之的是基于服务器的终端,在这些终端上运行此类软件更加困难。此外,有些神经认知评估系统也需要特定的硬件支持,不同的平台需要不同的评估软件和硬件环境,导致在临床中使用不同的评估任务需要安装和维护许多不同的软件包^[6]。而相同的任务在不同的评估环境中(如图形用户界面、鼠标、键盘和触摸屏灵敏度等差异)有可能出现不同的结果,甚至出现假性结果^[2]。

运行环境的发展趋势:目前的神经认知评估系统平台趋向于网页版在线评估,可以运行在任何工作站、PC、智能手机或平板电脑上^[6],而且在不同平台之间施测不需要过多地对任务重新进行等价性和信效度验证。

5.2 商业化探讨

前瞻产业研究院预计,2025 年人工智能在医疗行业的应用市场总值将达到两百多亿美元,中国医疗 AI 市场规模也在持续增长,预测在 2020 年达到 400 亿元人民币^[53]。而本文所讨论开发的适应中国人群的计算机化神经认知评估系统不仅可以应用于医院、教育、政府等各个行业,更主要的是可以结合 AI 技术和医学影像处理技术,形成医疗行业的商业化热点模型——AI+辅助诊疗模式^[54]。

计算机化神经认知评估系统的商业化是保证开发项目得到持续维护的最优策略。未来的商业化模式应优先考虑移动

医疗、数字医疗或互联网医疗等商业模式^[55],以信息技术和增强现实技术为驱动,明确特定的受众群体,采用服务收费的形式。在商业化过程中,可以借鉴多个开源的神经心理学实验工具箱^[56-63]的设计模式,完善本土化计算机化神经认知评估系统的架构。表 4 中的工具箱都提供了一整套刺激呈现和硬件接口,已经被广泛应用。

表 4 可供使用的开源工具箱
Table 4 Available open-source toolkits

工具箱	开源协议	运行环境	编程语言/环境
CogToolbox	MIT	Windows, Linux, OS X	MATLAB
Expyriment	GPLv3	Windows, Linux, OS X, Android	Python
OpenSesame	GPLv3	Windows, Linux, OS X, Android	Python
PEBL	GPL	Windows, Linux, OS X	图形化编程
PsychoPy	GPLv3	Windows, Linux, OS X	Python, 图形化编程
PsychToolbox	MIT	Windows, Linux, OS X	MATLAB, Octave
Psyscope X	GPL	OS X	图形化编程

结束语 计算机化神经认知评估系统作为评估和治疗神经认知障碍的人群的重要工具,其重要性日益突显。本文首先介绍了神经认知评估的发展历程,将其划分为 4 个时代;其次阐述了对神经认知评估进行计算机化的必要性,并调研了国内外已有的计算机化评估系统;接着通过比较已有的计算机评估系统,论证了开发适合中国人群的系统的必要性;然后描绘了本土计算机神经认知评估系统的蓝图及其开发流程;最后剖析了计算机化神经认知评估系统现阶段面临的主要问题,展望了其未来的发展趋势,并初步探讨了商业化途径。

参 考 文 献

[1] BAUER R M, IVERSON G L, CERNICH A N, et al. Computerized Neuropsychological Assessment Devices: Joint Position Paper of the American Academy of Clinical Neuropsychology and the National Academy of Neuropsychology [J]. The Clinical Neuropsychologist, 2012, 26(2): 177-196.

[2] EDWARDS J, VESS J, REGER G, et al. The Use of Virtual Reality in the Military's Assessment of Service Members With Traumatic Brain Injury: Recent Developments and Emerging Opportunities [J]. Applied Neuropsychology: Adult, 2014, 21(3): 220-230.

[3] TEEL E, GAY M, JOHNSON B, et al. Determining sensitivity/specificity of virtual reality-based neuropsychological tool for detecting residual abnormalities following sport-related concussion [J]. Neuropsychology, 2016, 30(4): 474-483.

[4] RUST J, GOLOMBOK S. 现代心理测量学(第 3 版)[M]. 李晓, 等译. 北京: 中国人民大学出版社, 2011.

[5] CLAESSEN M H G, HAM I J M V D, ZANDVOORT M J E V. Computerization of the Standard Corsi Block-Tapping Task Affects Its Underlying Cognitive Concepts: A Pilot Study [J]. Applied Neuropsychology: Adult, 2015, 22(3): 180-188.

[6] KESSELS R P C. Improving precision in neuropsychological assessment: bridging the gap between classic paper-and-pencil

- tests and paradigms from cognitive neuroscience[J]. *The Clinical Neuropsychologist*, 2019, 33(2): 357-368.
- [7] 郭起浩,洪震. 神经心理评估[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2013.
- [8] GUR R C, RICHARD J, HUGHETT P, et al. A cognitive neuroscience based computerized battery for efficient measurement of individual differences: Standardization and initial construct validation[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2010, 187(2): 254-262.
- [9] SWAGERMAN S C, DE GEUS E J C, KAN K J, et al. The Computerized Neurocognitive Battery: Validation, aging effects, and heritability across cognitive domains[J]. *Neuropsychology*, 2016, 30(1): 53-64.
- [10] GUR R E. Psychometric Properties of the Penn Computerized Neurocognitive Battery[J]. *Neuropsychology*, 2015, 29(2): 235-246.
- [11] CARLOZZI N E, GOODNIGHT S, CASALETTO K B, et al. Validation of the NIH Toolbox in Individuals with Neurologic Disorders[J]. *Archives of Clinical Neuropsychology the Official Journal of the National Academy of Neuropsychologists*, 2017, 32(5): 555-573.
- [12] BABAKHANYAN I, MCKENNA B S, CASALETTO K B, et al. National Institutes of Health, Toolbox Emotion Battery for English- and Spanish-speaking adults: normative data and factor-based summary scores [J]. *Patient Related Outcome Measures*, 2018, 9: 115-127.
- [13] HESSL D, SANSONE S M, BERRYKRAVIS E, et al. The NIH Toolbox Cognitive Battery for intellectual disabilities: three preliminary studies and future directions[J]. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 2016, 8(1): 35.
- [14] TULSKY D S, HOLDNACK J A, COHEN M L, et al. Factor structure of the NIH Toolbox Cognition Battery in individuals with acquired brain injury[J]. *Rehabilitation Psychology*, 2017, 62(4): 435-442.
- [15] EDWARDS M K, LOPRINZI P D. Experimental Effects of Acute Exercise and Meditation on Parameters of Cognitive Function[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2018, 7(6): 125.
- [16] ZHANG N, JIANG H F, WU J, et al. Reliability and Validity of the CogState Battery Chinese Language Version in Schizophrenia[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(9): e74258.
- [17] CABEÇA H L S, ROCHA L C, SABBÀ A F, et al. The subtleties of cognitive decline in multiple sclerosis: an exploratory study using hierarchical cluster analysis of CANTAB results [J]. *Bmc Neurology*, 2018, 18(1): 140.
- [18] COTTER J, VITHANAGE N, COLVILLE S, et al. Investigating Domain-Specific Cognitive Impairment Among Patients With Multiple Sclerosis Using Touchscreen Cognitive Testing in Routine Clinical Care[J]. *Frontiers in Neurology*, 2018, 9: 331.
- [19] CLAESDOTTER E, CERVIN M, ÅKERLUND S, et al. The effects of ADHD on cognitive performance[J]. *Nordic Journal of Psychiatry*, 2018, 72(3): 158-163.
- [20] CACCIAMANI F, SALVADORI N, EUSEBI P, et al. Evidence of practice effect in CANTAB spatial working memory test in a cohort of patients with mild cognitive impairment[J]. *Applied Neuropsychology: Adult*, 2018, 25(3): 237-248.
- [21] KOPF T, GALIC S, MATESIC K. The Efficiency of MMPI-2 Validity Scales in Detecting Malingering of Mixed Anxiety-Depressive Disorder[J]. *Alcoholism & Psychiatric Research Journal of Psychiatric Research & Addictions*, 2016, 52(1): 33-50.
- [22] SELBOM M, WAUGH M H, HOPWOOD C J. Development and Validation of Personality Disorder Spectra Scales for the MMPI-2-RF [J]. *Journal of Personality Assessment*, 2018, 100(4): 406-420.
- [23] WU Y C, ZOU Z K, SUN J J, et al. Value of Vienna Test System in psychological screening of flying cadets[J]. *Military Medical Sciences*, 2015, 39(2): 97-100.
- [24] STUBBS B, KU P W, CHUNG M S, et al. Relationship Between Objectively Measured Sedentary Behavior and Cognitive Performance in Patients With Schizophrenia Vs Controls[J]. *Schizophrenia Bulletin*, 2017, 43(3): 566-574.
- [25] GIGLER K L, BLOMEKE K, SHATIL E, et al. Preliminary evidence for the feasibility of at-home online cognitive training with older adults[J]. *Gerontechnology*, 2013, 12(1): 26-35.
- [26] SHEA T, KANE C, MICKENS M. A review of the use and psychometric properties of the cognistat/neurobehavioral cognitive status examination in adults post-cerebrovascular accident[J]. *Rehabil Psychol*, 2017, 62(2): 221-222.
- [27] GATES N J, KOCHAN N A. Computerized and on-line neuropsychological testing for late-life cognition and neurocognitive disorders: are we there yet? [J]. *Current Opinion in Psychiatry*, 2015, 28(2): 165-172.
- [28] DEDE E, ZALONIS I, GATZONIS S, et al. Integration of computers in cognitive assessment and level of comprehensiveness of frequently used computerized batteries[J]. *Neurology, Psychiatry and Brain Research*, 2015, 21(3): 128-135.
- [29] CANINI M, BATTISTA P, ROSA P A D, et al. Computerized Neuropsychological Assessment in Aging: Testing Efficacy and Clinical Ecology of Different Interfaces[J]. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2014, 2014: 804723.
- [30] 王刚. 痴呆及认知障碍神经心理测评量表手册[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [31] HODGES J R. 临床神经心理学认知评估手册(第2版)[M]. 熊丽, 等译. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014.
- [32] GIBBONS R D, WEISS D J, KUPFER D J, et al. Using Computerized Adaptive Testing to Reduce the Burden of Mental Health Assessment[J]. *Psychiatric Services*, 2008, 59(4): 361-368.
- [33] CAI Y, MIAO Y, TU D B. The polytomously scored cognitive diagnosis computerized adaptive testing[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 2016, 48(10): 1338-1346.
- [34] 涂冬波. 计算机化自适应测验: 理论与方法[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2017.
- [35] BILDER R M. Neuropsychology 3.0: Evidence-Based Science and Practice[J]. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 2011, 17(1): 7-13.
- [36] WOO E. Computerized Neuropsychological Assessments [J]. *CNS Spectrums*, 2008, 13(S16): 14-17.
- [37] PICARD R W, KLEIN J. Computers that recognize and respond to user emotion: theoretical and practical implications[J]. *Interacting with Computers*, 2002, 14(2): 141-169.
- [38] PARSONS T D, CARLEW A R, MAGTOTO J, et al. The po-

tential of function-led virtual environments for ecologically valid measures of executive function in experimental and clinical neuropsychology [J]. *Neuropsychological Rehabilitation*, 2017, 27(5):777-807.

[39] OLIVEIRA C R, LOPES F B J P, SUGARMAN M A, et al. Development and Feasibility of a Virtual Reality Task for the Cognitive Assessment of Older Adults: The ECO-VR[J]. *The Spanish Journal of Psychology*, 2016, 19: E95.

[40] BOTTIROLI S, TASSORELLI C, LAMONICA M, et al. Smart Aging Platform for Evaluating Cognitive Functions in Aging: A Comparison with the MoCA in a Normal Population[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2017, 9: 379.

[41] CÂNOVAS R, LEÓN I, SERRANO P, et al. Spatial navigation impairment in patients with refractory temporal lobe epilepsy: Evidence from a new virtual reality-based task[J]. *Epilepsy & Behavior*, 2011, 22(2): 364-369.

[42] ALEJANDRO T L, VALERO-AGUAYO L, DE L R E J. Visuo-spatial Orientation Learning through Virtual Reality for People with Severe Disability[J]. *International Journal of Disability, Development and Education*, 2017, 64(4): 420-435.

[43] PHILIP P, MICOULAUD-FRANCHI J A, SAGASPE P, et al. Virtual human as a new diagnostic tool, a proof of concept study in the field of major depressive disorders[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42656.

[44] GREWE P, LAHR D, KOHSIK A, et al. Real-life memory and spatial navigation in patients with focal epilepsy: Ecological validity of a virtual reality supermarket task[J]. *Epilepsy & Behavior*, 2014, 31: 57-66.

[45] JOVANOVSKI D, ZAKZANIS K, CAMPBELL Z, et al. Development of a Novel, Ecologically Oriented Virtual Reality Measure of Executive Function: The Multitasking in the City Test [J]. *Applied Neuropsychology Adult*, 2012, 19(3): 171-182.

[46] PARSONS T D, MCMAHAN T. An Initial Validation of the Virtual of the Virtual Environment Grocery Store[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2017, 291: 13-19.

[47] RENISON B, PONSFORD J, TESTA R, et al. The Ecological and Construct Validity of a Newly Developed Measure of Executive Function: The Virtual Library Task[J]. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 2012, 18(3): 440-450.

[48] LI M Y, WU H N, KUAI S G, et al. Application of virtual reality technology in assessment of executive function[J]. *Advances in Psychological Science*, 2017, 25(6): 933-942.

[49] SUN J L, DU Y S. Application of virtual reality technology in diagnosis and treatment of attention deficit hyperactivity disorder[J]. *Chinese Journal of Child Health Care*, 2018, 26(1): 37-39.

[50] POLLAK Y, WEISS P L, RIZZO A A, et al. The Utility of a Continuous Performance Test Embedded in Virtual Reality in Measuring ADHD-Related Deficits[J]. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*, 2009, 30(1): 2-6.

[51] KAPLAN R M, SACCUZZO D P. 心理测验: 原理, 应用和争论 (第 6 版) [M]. 陈国鹏, 等译. 上海: 上海人民出版社, 2010.

[52] NEGUT A, MATU S, SAVA F A, et al. Task difficulty of virtual reality-based assessment tools compared to classical paper-and-pencil or computerized measures: A meta-analytic approach [J]. *Computers in Human Behavior*, 2016, 54: 414-424.

[53] 前瞻网. 人工智能重新定义医疗行业, 智能医疗市场前景广阔 [EB/OL]. (2017-12-21) [2019-01-05]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/459/171221-310e39e9.html>.

[54] 凤凰网. “人工智能(AI+医疗)”, 市场蛋糕巨大, 门槛难迈 [EB/OL]. (2017-10-10) [2019-01-05]. http://www.sohu.com/a/197241494_156935.

[55] 91 运营网. 史上最全: 移动医疗的 14 种商业模式 [EB/OL]. (2015-04-14) [2019-01-05]. <http://www.91yunying.com/16613.html>.

[56] KRAUSE F, LINDEMANN O. Expyriment: A Python library for cognitive and neuroscientific experiments [J]. *Behavior Research Methods*, 2014, 46(2): 416-428.

[57] MATHÔT S, SCHREIJ D, THEEUWES J. OpenSesame: An open-source, graphical experiment builder for the social sciences [J]. *Behavior Research Methods*, 2012, 44(2): 314-324.

[58] MUELLER S T, PIPER B J. The Psychology Experiment Building Language (PEBL) and PEBL Test Battery [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2014, 222: 250-259.

[59] SHIELDS G S, MOONS W G, SLAVICH G M. Better executive function under stress mitigates the effects of recent life stress exposure on health in young adults [J]. *Stress*, 2017, 20(1): 92-102.

[60] PEIRCE J W. PsychoPy—Psychophysics software in Python [J]. *J. Neurosci. Methods*, 2007, 162(1/2): 8-13.

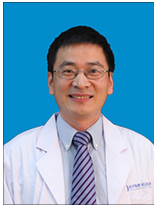
[61] CAVDAROGLU S, KNOPS A. Mental subtraction and multiplication recruit both phonological and visuospatial resources: evidence from a symmetric dual-task design [J]. *Psychological Research*, 2016, 80(4): 608-624.

[62] NUUTINEN M, MUSTONEN T, HÄKKINEN J. CFS MATLAB toolbox: An experiment builder for continuous flash suppression (CFS) task [J]. *Behavior Research Methods*, 2018, 50(5): 1933-1942.

[63] MACWHINNEY B, COHEN J, PROVOST J. The PsyScope experiment-building system [J]. *Spat Vis*, 1997, 11(1): 99-101.



ZHANG Zheng-lin, born in 1995, post-graduate. His main research interests include pattern recognition and intelligent system.



LI Hai, born in 1981, Ph.D., research fellow, Ph.D supervisor. His main research interests include artificial intelligence and medical image analysis.