

数字表型在神经外科的应用进展

杨沛轩* 白璐* 梁丰*[✉]

【摘要】数字表型(digital phenotyping)是一种通过收集个人数字设备的数据来跟踪个人行为模式并进行实时量化的技术。在神经外科领域,数字表型通过收集患者的步数、活动距离和GPS等反映患者活动功能的客观数据,评估其康复情况。该技术有高频次、客观的数据采集优势,还具备个性化、经济性等优点,但同时也面临着伦理、隐私和数据处理等挑战。未来数字表型需在完善伦理框架的同时,深化多病种研究并开发动态干预模型,以推动神经外科精准医疗发展。

【关键词】数字表型 神经外科 智能手机 被动数据 手术预后

【中图分类号】R651

【文献标识码】A

Application of digital phenotyping in neurosurgery. YANG Peixuan, BAI Lu, LIANG Feng. The First Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, No.58 Zhongshan Second Road, Guangzhou 510080, China. Tel: 020-87338234.

【Abstract】 Digital phenotyping is increasingly used in the medical field as a moment-by-moment quantification of individual human phenotypes using data from personal digital devices, such as smartphones and wearable sensors. Using this technology to obtain various kinds of data in patients' daily life for analysis can better predict the outcome of surgical patients and provide personalized treatment. In neurosurgery, digital phenotyping primarily focuses on monitoring postoperative outcomes in spinal surgery patients. Most studies employ objective data such as step counts, activity distances, and GPS trajectories to reflect functional mobility changes and assess rehabilitation progress. This technology demonstrates advantages including high-frequency objective data collection, personalization, and cost-effectiveness, yet faces challenges related to ethics, privacy and data processing. Future development of digital phenotyping requires refining ethical frameworks while advancing multi-disease research and developing dynamic intervention models to promote precision medicine in neurosurgery.

【Keywords】 Digital phenotyping Neurosurgery Smartphone Passive data Surgical outcome

数字表型(digital phenotyping)是一种新兴的移动医疗技术,利用智能手机和可穿戴设备收集患者的多种数据流,帮助医生持续访问和分析患者日常生活数据,制定治疗策略,评估治疗效果^[1]。数字表型最早应用于心理健康领域,医生通过收集患者自我评估的情绪、每日步数、通话时长、短信频率等数据,管理各类精神疾病^[2-6],近年来在神经外科中应用逐渐普及。本文旨在概述数字表型在神经外科的应用,分析其在围手术期管理中的潜力与局限性。

1 数字表型的基本概念

1.1 数字表型的定义 数字表型是一种利用个人数字设备

(如智能手机和可穿戴传感器等)的数据来跟踪个人行为模式并进行实时量化的方法,这些数据包括患者活动水平、交流习惯和其他可能与其健康相关的行为。数字表型旨在动态分析这些数据以实现加强对患者健康的监测、改善临床决策和提供个性化的治疗,并在一定程度上预测手术结果等目标^[7-8]。其中,“个人数字设备”强调了该方法收集和析的数据的个体化,“实时量化”则突出了数据的连续性。

数字表型利用个人数字设备生成主动数据和被动数据两类数据流。主动数据包括患者使用智能手机完成的调查或录制的录音等提供有关其健康状况的信息。被动数据主要包括传感器数据(如加速仪和陀螺仪)和使用日志(如通信日志或屏幕使用时间),由手机自动收集,无须患者输入。主动数据和被动数据都可用于开发监测患者的行为和功能状态的工具,评估手术或其他医疗干预后的生活质量结

doi:10.3969/j.issn.1002-0152.2025.03.008

* 中山大学附属第一医院神经外科(广州 510080)

[✉] 通信作者(E-mail:liangf6@mail.sysu.edu.cn)

果^[9]。被动数据兼有无感化、客观性、高频监测等优点,在目前的临床使用中更具发展前景。

1.2 技术载体 数字表型的技术载体包括硬件和软件两部分。硬件上,主要有智能手机和可穿戴设备。智能手机使用更为普及,便于无感化监测,是目前大多数研究的选择,可以通过其内置传感器采集身体活动、全球定位系统(global positioning system, GPS)定位、步态和加速度测量等客观指标^[10-16]。此外,在慢速行走这类更符合日常活动或术后活动能力下降的场景中,智能手机在记录步态等数据方面比可穿戴设备有效性更高^[17]。

可穿戴设备的优势在于,在测量运动步数之余还可直接测量活动距离,相较于手机通过GPS推算活动量,精度更高^[18]。此外,可穿戴设备还可监测心率、血压、呼吸频率和血氧饱和度等生命体征^[19],计算患者热量消耗以提供运动强度评估,实现监测维度拓展,使得评估更加全面^[20]。

软件上,常用软件包括Bewei、QS Access和6WT等,功能侧重各有不同^[21]。Bewei应用可以结合手机传感器数据及患者的调查数据,定量评估患者整个治疗过程的活动趋势^[22]。QS Access通过导出Apple Health的数据,可提供每日移动距离、爬楼梯次数和步数的情况,并管理Oswestry残疾指数、患者报告的疼痛评分等问卷^[10]。6WT则采用6 min步行距离测试来识别居家环境下的客观功能障碍^[15]。

1.3 数字表型的评估 数字表型可以采用患者报告结局指标(patient-reported outcome measurements, PROMs)进行评估^[10-11, 13, 23-27]。PROMs通过问卷形式收集患者对其身体、情感和社会健康的看法,是患者对自身情况基于提问的主观反馈^[28-29]。通过验证其与PROMs的一致性,可以评估数字表型是否能准确反映相关疾病的临床结局。

2 数字表型在神经外科中应用的现状

2.1 脊髓脊柱方向 在神经外科领域,数字表型的应用多数集中在脊髓脊柱外科^[10, 12-13, 18, 30]。其中,绝大部分的研究主要聚焦数字表型在椎板切除或融合减压术患者预后监测和评估中的应用,重点关注活动功能恢复和疼痛缓解等指标。COTE等^[13]首次报告了该技术的应用,通过Beiwe程序收集105例脊柱术后患者的GPS数据及疼痛自评信息,证实疼痛强度与活动能力呈负相关;类似地,另一项研究纳入31例椎板切除或融合减压手术患者,经移动应用程序QS Access监测,发现术后活动趋势与反映疼痛情况的PROMs显著相关^[10];时空特征分析进一步揭示,相比于空间距离指标,时间特征在描述患者的体能状态方面更有优势^[12]。

MUALEM等^[31]回顾49篇关于可穿戴设备在神经外科患者中使用情况的文章,发现相关研究集中在脊柱手术领域(63%),多数为观察性研究。95%的研究支持远程医疗整合以降低门诊随访负担,其核心监测指标包括体力活动(如步数、行走距离)及运动障碍量化,通过提供客观数据(步态、活动水平等)减少主观偏倚风险。

2.2 功能神经外科方向 除了脊髓脊柱相关疾病,数字表型的研究集中于帕金森病、特发性震颤等神经功能病变上。22例接受深部脑刺激手术的帕金森病患者完成了虚拟就诊和远程评估,获得了更好的术后保健^[32];特发性震颤患者在居家环境中使用手机应用程序Lift Pulse,其测量的震颤严重程度结果与临床金标准Fahn-Tolosa-Marin震颤评定量表评估的结果高度一致^[33]。集成3D加速度传感器的压力鞋垫通过收集帕金森病患者的运动数据以监测冰冻步态,与临床医生在视频中标记的步态作对比,成功检测了90%的发作症状^[34]。这些研究均提示了数字表型在监测术后神经功能恢复方面的价值。

2.3 脑肿瘤方向 在肿瘤疾病方面,一项最新的研究评估了胶质母细胞瘤患者手机中记录的围手术期活动情况,发现数字表型有助于量化患者的行为和康复水平,并帮助患者将负担降至最低^[22]。

2.4 脑血管病方向 数字表型在脑血管的应用同样相对较少。现有研究显示,颈动脉内膜切除术术后患者使用三轴加速度计测量步频、步幅等客观数据,可以有效检测步态的改善,有望结合脑血流或代谢变化进一步评估预后^[35]。但该研究中的监测环境位于医疗场景,其反映的步态改善可能与真实日常生活存在偏差,因此,未来需通过可穿戴设备在自然生活场景中进行监测以构建更有效的客观评估体系。

3 数字表型用于神经外科的优点

3.1 高频客观的数据采集优势 通过智能设备,数字表型较传统临床评估具有四大优势^[36]:①高频监测,通过手机/可穿戴设备实现分钟级数据采集,突破传统随访的时间间隔限制;②客观性,传感器自动化、标准化采集规避患者主观报告偏差;③真实性,基于日常生活场景的数据更真实反映患者行为模式;④数据规模,长期连续监测可积累海量数据,为表型特征提供前所未有的广度和精度。

3.2 个性化与精准干预 数字表型的另一价值在于构建高度个体化的健康数字模型:通过对比实时数据与个人基线水平,自动识别偏离阈值的异常信号^[37]。该模型支持两种精准干预模式:①预测性监护,例如,基于可穿戴设备的连

续监测可量化脊柱术后康复动力学特征^[18];②动态适应性干预,根据实时数据调整康复方案,例如帕金森病患者冻结步态发作时触发震动提示^[34]。研究证实,接受移动医疗与患者术后生活质量的改善、疼痛评分降低、残疾减少和自我康复率较高等趋势呈一致的关联,这表明仅数据可视化反馈本身即具有干预价值^[38],这种“观察者效应”揭示了数字表型对神经可塑性的潜在调控机制。

3.3 实惠、便捷 与昂贵、高度监管的医疗级设备不同,基于智能手机的数字表型更具有应用便利性^[39]。随着智能手机的普及,研究者借此收集数据可规避额外的设备投入,其配套软件部署成本较低。而患者端电子调查操作简单快捷且回复率更高。同时,相比于侵入性检查,数字表型的无创特点对术后恢复干扰较小,更易被接受^[13]。

3.4 方法创新 此外,现有客观数据可通过创新应用释放新价值。例如,脊柱术后患者手机GPS数据与活动功能及生活质量的恢复息息相关^[13],而另一项研究也观察到GPS功能可以准确地描述脊柱疾病患者在围手术期的活动趋势^[12]。然而后者进一步构建了评估活动情况的时空维度指标如“回转半径”、“访问的位置数”和“重要地点停留时间占比”等,最终发现GPS数据在空间和时间角度上的差异性。这类创新性运用凸显了数字表型在数据处理环节的深层潜能潜力。

4 数字表型的局限和挑战

4.1 伦理问题 应用数字表型涉及以下伦理问题^[40]:①知情同意困难。技术的进步使得如何确保公众真正理解并同意使用他们的数据变得具有挑战性,尤其在动态监测方面,大多数患者在初始同意后往往未调整权限。②隐私暴露风险。如前所述,GPS数据固然可以反映患者活动情况,但存在泄露患者居住住址、活动行踪等隐患。③技术公平性。例如,部分老年人及低收入人群的手机覆盖率低,导致其无法参与数字公共卫生监测。④所有权争议。尽管已有部分方案,但就如何解决被动数据存储和所有权问题目前尚未达成共识。

4.2 技术挑战 数字表型的应用主要面临两方面技术挑战^[41]:①数据收集。主动数据的收集依赖患者的积极参与,但往往给患者造成负担导致依从性下降,而被动数据需要克服大数据储存压力、数据准确性和设备续航等问题。此外,部分采集方式(如基于键盘的交互监测)可能干扰用户体验,对最终的结果分析造成影响。②数据分析。例如人们携带手机的方式不同、使用习惯各异,加之存在夜间关机

等情况,会增加手机数据分析的复杂性。同时还要考虑到采样周期差异导致的数据丢失。Beiwe平台对传感器进行1 min采样,然后关闭9 min,采样率为10%,如果忽略这部分缺失数据可能引发统计偏倚。

4.3 其他局限 还有研究表明应考虑一些其他的潜在风险和条件。例如心理学上的霍桑效应,当患者意识到自己的行为通过智能手机或其他数字设备被持续监测时,可能会刻意改变其行为模式,从而导致数据失真^[37]。TOMIČIĆ等^[42]报告未来研究中的方法学问题,例如疾病边界重构的争议,以及由于技术和营销策略的快速发展导致的语义标准化挑战等。此外,LI等^[43]提出了该技术在经济效益评估层面的文献尚有限,需要进一步数据研究。

5 总结与展望

相比于传统的临床调查和试验等,数字表型具有能够更高频和客观地收集和反映患者日常生活的数据的优点,数据量大,能为表型特征提供前所未有的广度和精度。目前,神经外科领域中数字表型的研究主要集中在脊髓脊柱方向,而其他亚专业的报道较少,该技术在神经外科领域的应用有巨大的探索空间。

参考文献

- [1] PANDA N, PEREZ N, TSANGARIS E, et al. Enhancing Patient-Centered Surgical Care With Mobile Health Technology[J]. J Surg Res, 2022, 274: 178-184.
- [2] MONTAG C, SINDERMAN C, BAUMEISTER H. Digital phenotyping in psychological and medical sciences: a reflection about necessary prerequisites to reduce harm and increase benefits[J]. Curr Opin Psychol, 2020, 36: 19-24.
- [3] MARSCH L A. Digital health data-driven approaches to understand human behavior[J]. Neuropsychopharmacology, 2021, 46(1): 191-196.
- [4] JACOBSON N C, SUMMERS B, WILHELM S. Digital Biomarkers of Social Anxiety Severity: Digital Phenotyping Using Passive Smartphone Sensors[J]. J Med Internet Res, 2020, 22(5): e16875.
- [5] 竺腾, 莫苡楠, 金瑞琳, 等. 数字疗法在精神科的临床应用与发展[J]. 中国神经精神疾病杂志, 2023, 49(10): 625-630.
- [6] 石雅雯, 陈天真, 杜江, 等. 生态瞬时评估在精神心理数字医疗方向的应用[J]. 中国神经精神疾病杂志, 2023, 49(8): 503-508.
- [7] JAIN S H, POWERS B W, HAWKINS J B, et al. The digital phenotype[J]. Nat Biotechnol, 2015, 33(5): 462-463.

- [8] BARNETT S, HUCKVALE K, CHRISTENSEN H, et al. Intelligent Sensing to Inform and Learn (InSTIL): A Scalable and Governance-Aware Platform for Universal, Smartphone-Based Digital Phenotyping for Research and Clinical Applications[J]. *J Med Internet Res*, 2019, 21(11): e16399.
- [9] TOROUS J, KIANG M V, LORME J, et al. New Tools for New Research in Psychiatry: A Scalable and Customizable Platform to Empower Data Driven Smartphone Research[J]. *JMIR Ment Health*, 2016, 3(2): e16.
- [10] CHAUHAN D, AHMAD H S, SUBTIRELU R, et al. Defining the minimal clinically important difference in smartphone-based mobility after spine surgery: correlation of survey questionnaire to mobility data[J]. *J Neurosurg Spine*, 2023, 39(3): 427–437.
- [11] SPRAU A C, BASIL G, BOROWSKY P, et al. Patient Participation With a Mobile Phone Application for Objective Activity Assessment Before and After Spinal Fusion[J]. *Cureus*, 2020, 12(9): e10326.
- [12] BOARO A, LEUNG J, REEDER H T, et al. Smartphone GPS signatures of patients undergoing spine surgery correlate with mobility and current gold standard outcome measures[J]. *J Neurosurg Spine*, 2021, 35(6):796–806.
- [13] COTE D J, BARNETT I, ONNELA J P, et al. Digital Phenotyping in Patients with Spine Disease: A Novel Approach to Quantifying Mobility and Quality of Life[J]. *World Neurosurg*, 2019, 126: e241–e249.
- [14] AHMAD H S, YANG A I, BASIL G W, et al. Developing a Prediction Model for Identification of Distinct Perioperative Clinical Stages in Spine Surgery With Smartphone-Based Mobility Data [J]. *Neurosurgery*, 2022, 90(5): 588–596.
- [15] ZEITLBERGER A M, SOSNOVA M, ZIGA M, et al. Distance to first symptoms measured by the 6-min walking test differentiates between treatment success and failure in patients with degenerative lumbar disorders[J]. *Eur Spine J*, 2022, 31(3): 596–603.
- [16] MALDANER N, SOSNOVA M, ZEITLBERGER A M, et al. Responsiveness of the self-measured 6-minute walking test and the Timed Up and Go test in patients with degenerative lumbar disorders[J]. *J Neurosurg Spine*, 2021, 35(1): 52–59.
- [17] HÖCHSMANN C, KNAIER R, EYMANN J, et al. Validity of activity trackers, smartphones, and phone applications to measure steps in various walking conditions[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2018, 28(7): 1818–1827.
- [18] MAHARAJ M, NATARAJAN P, FONSEKA R D, et al. The concept of recovery kinetics: an observational study of continuous post-operative monitoring in spine surgery[J]. *J Spine Surg*, 2022, 8(2): 196–203.
- [19] MA C, XU H, LI D, et al. [Research progress on wearable physiological parameter monitoring and its clinical applications][J]. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi*, 2021, 38(3): 583–593.
- [20] KIM D H, NAM K H, CHOI B K, et al. The Usefulness of a Wearable Device in Daily Physical Activity Monitoring for the Hospitalized Patients Undergoing Lumbar Surgery[J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2019, 62(5): 561–566.
- [21] LEIBOLD A, MANSOOR A D, HARROP J, et al. Smartphone-based activity tracking for spine patients: Current technology and future opportunities[J]. *World Neurosurg X*, 2024, 21:100238.
- [22] NAWABI N, EMEDOM-NNAMDI P, KILGALLON J L, et al. Assessing Mobility in Patients With Glioblastoma Using Digital Phenotyping-Piloting the Digital Assessment in Neuro-Oncology [J]. *Neurosurgery*, 2025, 96(1): 183–192.
- [23] NORTH K, SIMPSON G M, STUART A R, et al. Early postoperative step count and walking time have greater impact on lower limb fracture outcomes than load-bearing metrics[J]. *Injury*, 2023, 54(7): 110756.
- [24] ZIGA M, SOSNOVA M, ZEITLBERGER A M, et al. Objective outcome measures may demonstrate continued change in functional recovery in patients with ceiling effects of subjective patient-reported outcome measures after surgery for lumbar degenerative disorders[J]. *Spine J*, 2023, 23(9): 1314–1322.
- [25] IOVANEL G, AYERS D, ZHENG H. The Role of Wearable Technology in Measuring and Supporting Patient Outcomes Following Total Joint Replacement: Review of the Literature[J]. *JMIR Perioper Med*, 2023, 6: e39396.
- [26] LOO J H, HAI H H, BIN A R H. Effectiveness of Sensor-based Rehabilitation in Improving Outcomes in Patients Undergoing Total Knee Arthroplasty[J]. *Surg Technol Int*, 2022, 41: 301–314.
- [27] ORSI A D, MATHEW M, PLASKOS C, et al. Patient reported outcome measures correlate with step-count in total hip arthroplasty[J]. *Technol Health Care*, 2024, 32(5): 3727–3736.
- [28] MUEHLHAUSEN W, DOLL H, QUADRI N, et al. Equivalence of electronic and paper administration of patient-reported outcome measures: a systematic review and meta-analysis of studies conducted between 2007 and 2013[J]. *Health Qual Life Outcomes*, 2015, 13:167.
- [29] JENSEN R E, ROTHROCK N E, DEWITT E M, et al. The role of technical advances in the adoption and integration of patient-reported outcomes in clinical care[J]. *Med Care*, 2015, 53(2): 153–159.

- [30] AHMAD H S, SINGH S, JIAO K, et al. Data-driven phenotyping of preoperative functional decline patterns in patients undergoing lumbar decompression and lumbar fusion using smartphone accelerometry[J]. *Neurosurg Focus*, 2022, 52(4): E4.
- [31] MUALEM W, DURRANI S, LAKOMKIN N, et al. Utilizing Data from Wearable Technologies in the Era of Telemedicine to Assess Patient Function and Outcomes in Neurosurgery: Systematic Review and Time-Trend Analysis of the Literature[J]. *World Neurosurg*, 2022, 166: 90–119.
- [32] XU X, ZENG Z, QI Y, et al. Remote video-based outcome measures of patients with Parkinson's disease after deep brain stimulation using smartphones: a pilot study[J]. *Neurosurg Focus*, 2021, 51(5): E2.
- [33] CHOCKALINGAM A, BOGGS H, PRUSIK J, et al. Evaluation of Quantitative Measurement Techniques for Head Tremor With Thalamic Deep Brain Stimulation[J]. *Neuromodulation*, 2017, 20(5): 464–470.
- [34] MARCANTE A, DI MARCO R, GENTILE G, et al. Foot Pressure Wearable Sensors for Freezing of Gait Detection in Parkinson's Disease[J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 21(1): 128.
- [35] TAKAHASHI T, FUJIWARA S, IGARASHI S, et al. Comparison of Subjective and Objective Assessments on Improvement in Gait Function after Carotid Endarterectomy[J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(22): 6590.
- [36] TAYLOR K I, STAUNTON H, LIPSMEIER F, et al. Outcome measures based on digital health technology sensor data: data- and patient-centric approaches[J]. *NPJ Digit Med*, 2020, 3: 97.
- [37] COGHLAN S, D' ALFONSO S. Digital Phenotyping: an Epistemic and Methodological Analysis[J]. *Philos Technol*, 2021, 34(4):1905–1928.
- [38] DUMITRA T, GANESCU O, HU R, et al. Association Between Patient Activation and Health Care Utilization After Thoracic and Abdominal Surgery[J]. *JAMA Surg*, 2021, 156(1): e205002.
- [39] SHAH N V, GOLD R, DAR Q A, et al. Smart Technology and Orthopaedic Surgery: Current Concepts Regarding the Impact of Smartphones and Wearable Technology on Our Patients and Practice[J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2021, 14(6): 378–391.
- [40] KILGALLON J L, TEWARIE I A, BROEKMAN M, et al. Passive Data Use for Ethical Digital Public Health Surveillance in a Postpandemic World[J]. *J Med Internet Res*, 2022, 24(2): e30524.
- [41] ONNELA J P. Opportunities and challenges in the collection and analysis of digital phenotyping data[J]. *Neuropsychopharmacology*, 2021, 46(1): 45–54.
- [42] TOMIČIĆ A, MALEŠEVIĆ A, ČARTOLOVNI A. Ethical, Legal and Social Issues of Digital Phenotyping as a Future Solution for Present-Day Challenges: A Scoping Review[J]. *Sci Eng Ethics*, 2021, 28(1): 1.
- [43] LI Y, CHEN W, LIANG Y, et al. Evaluation of Mobile Health Technology Interventions for the Postdischarge Management of Patients With Head and Neck Cancer: Scoping Review[J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2023, 11: e49051.

(收稿日期:2024-09-29 录用日期:2025-03-27)

(责任编辑:甘章平)

我刊对病例报告摘要的要求：病例报告的摘要为报道性摘要，300字以内为宜。可参考以下6个要素：简要病史，主要症状体征，诊断，治疗，临床转归，以及明本报告的意义或者特殊性。突出中心内容；不得简单重复题名、引言、结论，不宜有大量关于研究背景的描述，应避免出现主观性极强的描述；不用非公知公用的符号和术语，不能用引文，缩略语、简称、代号在首次出现时必须加以说明，不用图表、公式、化学结构等。