

DOI : 10.3760/cma.j.cn112338-20230724-00036

收稿日期 : 2023-07-24

本文编辑 : 万玉立

中国慢性病前瞻性研究

客观测量身体行为的大型人群队列研究进展与实践

陈媛媛¹ 柯雅蕾¹ 吕筠^{1,2,3} 孙点剑^{1,2,3} 潘焯² 裴培² 杜怀东^{4,5} 陈君石⁶ 陈铮鸣⁵ 李立明^{1,2,3}

Aiden Doherty^{7,8} 余灿清^{1,2,3} 代表中国慢性病前瞻性研究项目协作组

¹北京大学公共卫生学院流行病与卫生统计学系, 北京 100191; ²北京大学公众健康与重大疫情防控战略研究中心, 北京 100191; ³重大疾病流行病学教育部重点实验室(北京大学), 北京 100191; ⁴牛津大学医学研究委员会人口健康研究组, 牛津 OX3 7LF; ⁵牛津大学临床与流行病学研究中心纳菲尔德人群健康系, 牛津 OX3 7LF; ⁶国家食品安全风险评估中心, 北京 100022; ⁷牛津大学纳菲尔德人群健康系, 牛津 OX3 7LF; ⁸牛津大学李嘉诚健康信息探索中心大数据研究所, 牛津 OX3 7LF

通信作者: 余灿清, Email: yucanqing@pku.edu.cn

【摘要】 受限于传统自我报告问卷测量方法的信效度, 身体行为(身体活动、久坐行为和睡眠)的准确测量受到很大限制。随着科学技术的发展, 加速度计等客观测量设备能够更加准确、全面地测量身体行为相关特征, 并逐渐为大规模流行病学研究所用。然而, 我国乃至亚洲人群尚缺乏采集身体行为客观测量数据的大型队列研究。中国慢性病前瞻性研究(CKB)在第三次重复调查(2020年8月至2021年12月)使用Axivity Ax3腕式三轴加速度计测量研究对象的日常活动及睡眠情况, 最终共纳入全国10个项目地区20370名研究对象, 其中女性占65.2%, 年龄(65.4±9.1)岁, 不同项目地区研究对象的体行为活动水平具有较大差异。CKB项目开展的体行为客观测量数据为描述我国中老年人24小时体行为特征、探究身体活动、久坐行为以及睡眠的健康效应以及其与疾病的深入研究提供了具有重要价值的科研资源。

【关键词】 身体行为; 客观测量; 队列研究

基金项目: 国家自然科学基金(82192901, 82192904, 82192900); 英国 Wellcome Trust (212946/Z/18/Z, 202922/Z/16/Z, 104085/Z/14/Z, 088158/Z/09/Z); 中国香港 Kadoorie Charitable 基金

Progress and practice of objective measurement of physical behaviors in large-scale cohort research

Chen Yuanyuan¹, Ke Yalei¹, Lyu Jun^{1,2,3}, Sun Dianjianyi^{1,2,3}, Pan Lang², Pei Pei², Du Huaidong^{4,5}, Chen Junshi⁶, Chen Zhengming⁵, Li Liming^{1,2,3}, Aiden Doherty^{7,8}, Yu Canqing^{1,2,3}, for the China Kadoorie Biobank Collaborative Group

¹Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China; ²Peking University Center for Public Health and Epidemic Preparedness & Response, Beijing 100191, China; ³Key Laboratory of Epidemiology of Major Diseases (Peking University), Ministry of Education, Beijing 100191, China; ⁴Medical Research Council Population Health Research Unit at the University of Oxford, Oxford OX3 7LF, United Kingdom; ⁵Clinical Trial Service Unit & Epidemiological Studies Unit (CTSU), Nuffield Department of Population Health, University of Oxford, Oxford OX3 7LF, United Kingdom; ⁶China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China; ⁷Nuffield Department of Population Health, University of Oxford, Oxford OX3 7LF, United Kingdom; ⁸Big Data Institute, Li Ka Shing Centre for Health Information and Discovery, University of Oxford, Oxford OX3 7LF, United Kingdom
Corresponding author: Yu Canqing, Email: yucanqing@pku.edu.cn

【Abstract】 Due to the limited reliability of traditional self-completed questionnaire, the accuracy of measurement of physical behaviors (physical activity, sedentary behavior and sleep) is not high. With the development of technology, wearable devices (e.g. accelerometer) can be used for more accurate measurement of physical behaviors and have great application potential in large-scale research. However, the data of objective measurement of physical behaviors from large-scale cohort research in Asian populations are still limited. Between August 2020 and December 2021, the 3rd resurvey of China Kadoorie biobank (CKB) used Axivity Ax3 wrist triaxial accelerometer

to collect the data of people's daily activity and sleep status. A total of 20 370 subjects from 10 study areas were included in the study, in whom 65.2% were women, and the age was (65.4±9.1) years. The people's physical activity level varied greatly in different project areas. The objective measurement of people's physical behaviors in CKB project has provided valuable resources for the description of 24-hour patterns of physical behaviors and evaluation of the health effect of physical activity, sedentary behavior and sleep as well as their association with diseases in the elderly in China.屠

【Key words】 Physical behaviors; Objective measurement; Cohort study

Fund programs: National Natural Science Foundation of China (82192901, 82192904, 82192900); the UK Wellcome Trust (212946/Z/18/Z, 202922/Z/16/Z, 104085/Z/14/Z, 088158/Z/09/Z); Kadoorie Charitable Foundation in Hong Kong of China 身体行为包括人在一天 24 h 内进行的身体活动、久坐行为和睡眠行为。既往流行病学研究中, 身体行为的测量主要通过研究对象进行问卷调查。然而, 基于自我报告的主观测量方法的信、效度不高^[1], 在评估身体行为对于健康结局的关联和作用时也受到很大限制。尽管 WHO 对不同年龄段和特定人群给出了对应的 2020 年新版身体活动和久坐行为推荐标准^[2], 由于缺乏足够的剂量-反应关系证据, 健康指南中对于具体身体活动量的建议并不十分明确, 对于久坐行为也只提供了一般性指导。

准确测量暴露水平是确保流行病学研究能够得出准确结果的重要先决条件, 正确测量身体行为对识别其与健康结局关系、制定合理的指南政策和干预措施至关重要^[3]。随着技术的进步, 加速度计/计步器等可穿戴客观监测仪器的发展才使得客观测量成为可能并逐渐为流行病学研究所用。加速度计将身体某一部位(如腕部、腰部、大腿等)的活动记录为加速度信号, 并经过电脑程序将加速度信号转换为活动计数等信息, 再通过数理方法处理为适用于研究目的指标以探究身体行为与健康的关系。早期的加速度计因其昂贵的价格以及设备精度、算法等方面的限制, 仅适合在小范围研究中使用。近 20 年来, 加速度计从最初的单轴、双轴发展到如今常用的三轴, 变得更加便携、精确、可靠, 且具有更高的采样频率, 更大的测量范围、存储空间和电池容量, 以及更低的价格, 越来越多地在大规模监测和前瞻性队列研究中应用^[4]。加速度计的高分辨率信息和时间戳数据可以更加准确、全面地捕捉到问卷测量中易于遗漏的部分(例如非规律性的偶然活动、低强度身体行为等^[5]), 产生丰富的衍生变量, 这对研究者更加全面准确地探究各身体行为的类型、强度、频率和持续时间等指标与健康结局的关联具有重要意义。

一、客观测量身体行为的大型研究进展

自 2000 年以来, 越来越多的人群研究采用加速度计客观测量身体行为^[6-7], 尤其是 2006-2013 年, 诸如美国国家健康和营养调查(NHANES)、英国生物银行(UKB)等大规模研究逐渐进行身体行为的客观测量, 并在最近十年逐步开展前瞻性研究评价客观测量身体行为的健康效应。

NHANES 研究进行两轮身体行为的客观测量^[8-9], 分别于 2003-2006 年使用穿戴于腕部的 ActiGraph 7164 和 2011-2014 年使用穿戴于腕部的 ActiGraph GT3X+ 加速度计。在第一轮测量中, 要求研究对象在 7 d 内所有清醒时间佩戴加速度计(游泳、洗澡时摘下), 由于设备便利性等问题导致研究的依从性不高(仅有 6 329 和 4 867 名研究对象提供了 1 d 和 ≥4 d 的监测数据)。在第二轮研究中改用腕部佩戴的防水设备, 依从性大大改善, 并能够对睡眠行为进行测量, 最终纳入 14 705 名研究对象。

UKB 研究于 2013-2015 年对 45~69 岁成年人开展身体行为的客观测量^[10]。项目通过电子邮件邀请研究, 发放 Axivity Ax3 的腕带式加速度计(运动手环), 要求受试者穿戴 7 d 并在测量结束后将设备邮寄回指定地点(邮寄资费由 UKB 支付), 应答率为 44.2%, 最终共纳入 96 600 名研究对象的测量数据。目前, UKB 数据使用者利用客观测量的身体行为数据发表了一系列研究成果, 包括其与多种慢性病的横断面关联^[11]、主客观测量身体行为的比较^[12]、肥胖/握力与未来身体行为^[13]、身体行为时间分配与心血管疾病发病风险^[14]、客观测量身体行为的全基因组关联研究^[15]等。

除此之外, 瑞典^[16]、挪威^[17]、荷兰^[18]、澳大利亚^[19]等国也逐渐将客观测量设备应用于

各种规模和目的的人群研究。亚洲地区客观测量身体行为的相关研究较少，日本 Nakanojo 研究^[20]和长寿纵向研究^[21]、新加坡健康研究^[22]、韩国国民健康和营养调查^[23]等开展了小规模尝试。目前我国加速度计的应用非常有限^[24]，对于成年人特别是中老年人群的研究较少，且研究范围多局限于地区，样本量多为几十至几百例。

二、 客观测量身体行为的实践

中国慢性病前瞻性研究 (CKB) 在全国 10 个地区【5 个城市地区 (黑龙江省哈尔滨市、山东省青岛市、江苏省苏州市、广西壮族自治区柳州市、海南省海口市) 和 5 个农村地区 (甘肃省天水市、四川省彭州市、河南省辉县市、浙江省桐乡市、湖南省浏阳市)】招募 50 万余名 30~79 岁成年人建立队列研究，从遗传、环境、生活方式等方面研究我国主要慢性病的致病因素、发病机理、流行规律和趋势^[25-26]。CKB 项目每隔 4~5 年对仍然留存在队列的成员中随机抽取 5% 进行重复调查。2020 年 3 月至 2021 年 12 月，CKB 项目开展第三次重复调查，完成了 25 087 名研究对象的问卷调查、体格指标测量、生物样本采集等项目。此次调查增加运动手环测量项目，对调查对象的日常活动及睡眠情况进行监测，旨在未来进一步评价身体行为客观测量指标的健康效应，从而为身体行为相关指南制定、慢性病的三级预防奠定基础。

此次调查采用了和 UKB 相同的客观测量设备 (Axivity AX3 腕戴式三轴加速度计)，采集连续 7 日的日常活动及睡眠相关情况。该设备由纽卡斯尔大学开放实验室 (Open Lab) 设计的 Open Movement AX3 开源传感器的商业版本，其测量准确性已通过多轴振动测试的验证^[27]。在 CKB 第三次重复调查现场，研究对象签署书面知情同意后，调查员将关联了研究对象专属研究编码的运动手环佩戴在研究对象利手的手腕上，并交代佩戴注意事项，包括任何环境下都可以保持佩戴 (桑拿浴房等高温环境和潜水等高压环境除外)，需连续佩戴 7 d，直到第 8 天将运动手环送回指定地点等。手环回收后，由地区项目工作人员对运动手环进行数据下载、充电及设备清空、交接，以供再使用。

项目于 2020 年 8-12 月首先分别在苏州 (城市) 和浙江 (农村) 2 个项目地区开展，次年完成其余 8 个地区的实施。手环原始数据使用与 UKB 类似的程序 Biobank Accelerometer Analysis 6.2.1 处理并使用机器学习分类方法提取身体行为相关信息^[10,14]。身体行为相关信息包括总活动水平 (平均加速度，单位：mg [毫重力加速度]) 和 4 类身体行为 (中高强度身体活动、低强度身体活动、久坐行为和睡眠) 的时长 (h)。研究算法通过 2017 年收集的 105 名 24 小时加速度计数据和可穿戴相机的视频数据 (CAPTURE-24CN) 进行优化调整，充分捕捉中国人群活动特点。然后对提取的数据进行质量控制，包括突发事件处理、重校正、剔除重复值、状态匹配、剔除问卷数据不完整对象等。最终，在完成第三次重复调查的 25 087 名研究对象中，22 511 名研究对象 (89.7%) 同意佩戴并交回运动手环。除了 555 名研究对象的手环数据无法读取，在质控中剔除了 60 名问卷信息不完整的研究对象和 2 条无法重校正的记录，并进一步剔除 1 511 名穿戴时间不足及 13 名加速度水平过高/过低的研究对象，最后剩余 20 370 名 (81.2%) 研究对象进入最终数据库，具体流程见图 1。

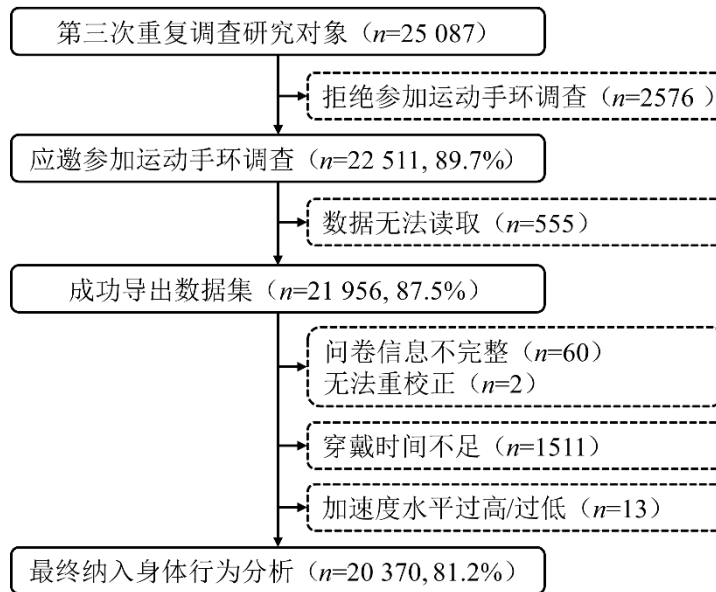


图 1 中国慢性病前瞻性研究运动手环项目数据质量控制流程

10 个地区研究对象年龄为 (65.4±9.1) 岁，女性占 65.2%。农村地区研究对象占 58.6% (14 763/25 087)，城市地区研究对象的年龄大于农村地区、女性比例高于农村 (均 $P < 0.001$)。见表 1。在主要社会人口学特征上，绝大多数为高中及以下学历 (95.4%)，82.1% 为已婚，在职、家务/待业、退休者分别占 28.9%、37.9%、33.2%。在性别差异上，男性研究对象年龄稍高于女性 [男性：(66.1±9.2) 岁，女性：(65±9.0) 岁]，男性已婚比例、文化程度初中及以上、在职比例均高于女性 (P 值均小于 0.001)。见表 2。

表 1 中国慢性病前瞻性研究运动手环项目 10 个项目地区入选人群特征

项目地区	起止日期 (年/月/日)	调查人数	入选人数 (入选率， %)	女性比例 (%)	年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)
农村					
浙江	2020/08/29- 2020/12/09	2 919	1 306 (44.7)	65.2	66.4±8.6
湖南	2021/03/16- 2021/06/11	3 035	2 648 (87.2)	61.6	65.4±9.2
甘肃	2021/06/21- 2021/08/29	2 600	2 399 (92.3)	66.3	63.4±9.2
四川	2021/08/30- 2021/12/15	2 897	2 580 (89.1)	66.2	65.0±9.2
河南	2021/09/26- 2021/12/18	3 312	3 010 (90.9)	62.1	64.3±8.8
小计	2020/08/29- 2021/12/18	14 763	11 943 (80.9)	64.0	64.8±9.1
城市					
苏州	2020/08/22- 2020/11/06	2 757	2 111 (76.6)	59.0	64.7±9.1
海口	2021/03/05- 2021/05/03	1 489	1 150 (77.2)	71.0	64.9±9.9
哈尔滨	2021/05/11- 2021/09/09	1 701	1 550 (91.1)	65.3	65.2±9.1
青岛	2021/05/19- 2021/08/11	1 625	1 491 (91.8)	75.3	68.9±8.1

柳州	2021/09/09- 2021/12/16	2 752	2 125 (77.2)	68.1	67.5±8.1
小计	2020/08/22- 2021/12/16	10 324	8 427 (81.6)	67.0	66.3±9.0
合计	2020/08/22- 2021/12/18	25 087	20 370 (81.2)	65.2	65.4±9.1

注：以城市名称表示城市项目点，以省份名称表示农村项目点
表 1 展示了 CKB 项目运动手环数据集在

表 2 中国慢性病前瞻性研究运动手环项目研究对象社会人口学特征

基本特征	全人群 (n=20 370)	男性 (n=7 079)	女性 (n=13 291)
年龄组 (岁)			
40~	381 (1.9)	112 (1.6)	269 (2.0)
50~	6 346 (31.1)	2 022 (28.5)	4 324 (32.6)
60~	7 225 (35.5)	2 493 (35.2)	4 732 (35.6)
70~	5 143 (25.2)	1 937 (27.4)	3 206 (24.1)
≥80	1 275 (6.3)	515 (7.3)	760 (5.7)
婚姻状况			
已婚	16 721 (82.1)	6 355 (89.8)	10 366 (78.0)
其他	3 649 (17.9)	724 (10.2)	2 925 (22.0)
文化程度			
小学及以下	10 371 (50.9)	2 979 (42.1)	7 392 (55.6)
中学	9 071 (44.5)	3 669 (51.8)	5 402 (40.7)
大学及以上	928 (4.6)	431 (6.1)	497 (3.7)
家庭年收入 (元)			
<20 000	3 141 (15.4)	1 075 (15.2)	2 066 (15.5)
20 000~	9 022 (44.3)	2 995 (42.3)	6 027 (45.4)
>75 000	8 207 (40.3)	3 009 (42.5)	5 198 (39.1)
工作状况			
在职	5 892 (28.9)	2 942 (41.6)	2 950 (22.2)
家务/待业	7 727 (37.9)	1 949 (27.5)	5 778 (43.5)
退休	6 751 (33.2)	2 188 (30.9)	4 563 (34.3)

注：括号外数据为人数，括号内数据为构成比 (%)；经统计学检验，男女性特征差异检验均 $P < 0.001$ 。

研究对象每日总活动水平为 (31.1 ± 12.2) mg，睡眠、久坐、轻度身体活动和中高强度身体活动的每日平均时长分别为 (7.8 ± 1.4) 、 (8.8 ± 2.9) 、 (5.7 ± 2.1) 和 (1.7 ± 1.3) h。身体行为指标城乡差异明显，城市地区研究对象的总体活动水平较低，具有更少的身体活动、睡眠时长和更多的久坐行为 (均 $P < 0.001$)。不同项目地区研究对象的模式具有较大差异，来自浙江和海口的研究对象活动水平较高，来自哈尔滨和青岛的研究对象活动水平较低而久坐时间较长。见表 3。

表 3 中国慢性病前瞻性研究运动手环项目 10 个项目地区研究对象每日身体行为水平

项目地区	加速度 ($\bar{mg}, x \pm s$)	中高强度身体 活动 ($\bar{h}, x \pm s$)	低强度身体 活动 ($\bar{h}, x \pm s$)	久坐行为 ($\bar{h}, x \pm s$)	睡眠 ($\bar{h}, x \pm s$)
------	--------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------	------------------------------

农村					
浙江	37.1±13.9	2.4±1.7	6.7±2.2	7.1±3.0	7.8±1.3
湖南	30.8±12.4	1.7±1.3	5.9±2.2	8.7±3.0	7.8±1.3
甘肃	32.4±12.3	1.8±1.2	5.9±2.2	8.8±2.8	7.5±1.4
四川	35.2±13.4	2.2±1.5	6.1±1.9	7.3±2.6	8.4±1.4
河南	28.2±10.9	1.5±1.2	5.6±2.0	8.6±2.7	8.3±1.5
小计	32.1±12.8	1.9±1.4	6.0±2.1	8.2±2.9	8.0±1.4
城市					
苏州	30.3±11.0	1.6±1.1	6.2±2.3	8.4±2.9	7.8±1.4
海口	36.0±13.2	2.3±1.4	5.6±2.0	8.7±2.8	7.4±1.5
哈尔滨	26.2±9.2	1.3±0.9	4.7±1.8	10.9±2.5	7.1±1.3
青岛	28.0±10.2	1.5±1.0	4.8±1.8	10.3±2.5	7.4±1.3
柳州	29.1±10.2	1.5±0.9	5.4±1.9	9.7±2.5	7.3±1.4
小计	29.6±11.1	1.6±1.1	5.4±2.1	9.6±2.8	7.4±1.4
合计	31.1±12.2	1.7±1.3	5.7±2.1	8.8±2.9	7.8±1.4

注：mg：毫重力加速度；经统计学检验，城乡各身体行为水平差异均 $P < 0.001$

三、 小结

身体行为客观测量设备的发展为研究者提供了广阔的研究前景。客观测量设备可以提供丰富的数据，根据研究需要的不同探讨各种身体行为模式及其相互关系对健康的影响，并更加精细地探究剂量-反应关系。需要注意的是，加速度计等客观测量设备也存在局限性。首先，客观测量实施门槛较高，佩戴依从性、设备本身及管理成本限制了其在大规模人群和长时间跨度的监测；其次，目前许多测量设备的设计仅对佩戴部位的位移和加速度敏感而对于其他活动准确性较低（例如骑自行车、抗阻负重活动等）；与主观问卷测量类似，客观测量方式也可能具有一定的霍桑效应，存在被调查者反应性问题；最后，由于客观测量设备的信息较为复杂，研究结果很大程度受到数据管理及处理过程的影响，这一问题在公共数据库中尤为明显，研究者应谨慎对待客观测量设备数据，其处理共识与标准是亟待解决的重要问题。

CKB 是亚洲地区率先使用加速度计测量身体行为的大规模的流行病学人群研究，对我国身体行为相关研究具有重要意义，为未来相关数据分析和研究提供可靠基础。整合 CKB 丰富的数据资源将有助于更好地探究身体行为与中国中老年人健康状况之间的关系，为制定更加准确适宜的身体行为指南提供依据，促进更高水平的大健康实现。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

志谢 感谢所有参加中国慢性病前瞻性研究项目的队列成员和各项目地区的现场调查队调查员；感谢项目管理委员会、国家项目办公室、牛津协作中心和 10 个项目地区办公室的工作人员；感谢英国生物银行项目提供运动手环设备

作者贡献声明 陈媛媛：分析/解释数据、论文撰写；柯雅蕾：统计分析；吕筠、孙点剑一、潘焯、裴培、杜怀东、Aiden Doherty：获取研究经费、实施研究、采集数据；陈君石、陈铮鸣、李立明：项目设计和方案制定；余灿清：分析方案确定、结果解释、获取研究经费、实施研究、采集数据

参考文献

- [1] Shephard RJ. Limits to the measurement of habitual physical activity by questionnaires[J]. Br J Sports Med, 2003, 37(3): 197-206. DOI: 10.1136/bjism.37.3.197.
- [2] World Health Organization. WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour[R]. Geneva: World Health Organization, 2020.
- [3] Janz KF. Physical activity in epidemiology: moving from questionnaire to objective measurement[J]. Br J Sports Med, 2006, 40(3): 191-192. DOI: 10.1136/bjism.2005.023036.
- [4] Chen KY, Janz KF, Zhu WM, et al. Redefining the roles of sensors in objective physical

- activity monitoring[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(Suppl 1): S13–23. DOI: 10.1249/MSS.0b013e3182399bc8.
- [5] Koolhaas C, Van Rooij F, Cepeda M, et al. Physical activity derived from questionnaires and wrist-worn accelerometers: comparability and the role of demographic, lifestyle, and health factors among a population-based sample of older adults[J]. *Clin Epidemiol*, 2017, 10: 1-16. DOI: 10.2147/CLEP.S147613.
- [6] Prince SA, Adamo KB, Hamel M, et al. A comparison of direct versus self-report measures for assessing physical activity in adults: a systematic review[J]. *Int J Behav Nutr Phys Act*, 2008, 5(1): 56. DOI: 10.1186/1479-5868-5-56.
- [7] Prince SA, Cardilli L, Reed JL, et al. A comparison of self-reported and device measured sedentary behaviour in adults: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Behav Nutr Phys Act*, 2020, 17(1): 31. DOI: 10.1186/s12966-020-00938-3.
- [8] Troiano RP, Berrigan D, Dodd KW, et al. Physical activity in the United States measured by accelerometer[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2008, 40(1): 181-188. DOI: 10.1249/mss.0b013e31815a51b3.
- [9] Belcher BR, Wolff-Hughes DL, Dooley EE, et al. US population-referenced percentiles for wrist-worn accelerometer-derived activity[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2021, 53(11): 2455-2464. DOI: 10.1249/MSS.0000000000002726.
- [10] Doherty A, Jackson D, Hammerla N, et al. Large scale population assessment of physical activity using wrist worn accelerometers: The UK biobank study[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0169649. DOI: 10.1371/journal.pone.0169649.
- [11] Barker J, Byrne KS, Doherty A, et al. Physical activity of UK adults with chronic disease: cross-sectional analysis of accelerometer-measured physical activity in 96 706 UK Biobank participants[J]. *Int J Epidemiol*, 2019, 48(4): 1167-1174. DOI: 10.1093/ije/dyy294.
- [12] Guo WJ, Key TJ, Reeves GK. Accelerometer compared with questionnaire measures of physical activity in relation to body size and composition: a large cross-sectional analysis of UK Biobank[J]. *BMJ Open*, 2019, 9(1): e024206. DOI: 10.1136/bmjopen-2018-024206.
- [13] Kim Y, White T, Wijndaele K, et al. Adiposity and grip strength as long-term predictors of objectively measured physical activity in 93 015 adults: the UK Biobank study[J]. *Int J Obes*, 2017, 41(9): 1361-1368. DOI: 10.1038/ijo.2017.122.
- [14] Walmsley R, Chan S, Smith-byrne K, et al. Reallocation of time between device-measured movement behaviours and risk of incident cardiovascular disease[J]. *Br J Sports Med*, 2022, 56(18): 1008-1017. DOI: 10.1136/bjsports-2021-104050.
- [15] Doherty A, Smith-Byrne K, Ferreira T, et al. GWAS identifies 14 loci for device-measured physical activity and sleep duration[J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 5257. DOI: 10.1038/s41467-018-07743-4.
- [16] Hagströmer M, Oja P, Sjöström M. Physical activity and inactivity in an adult population assessed by accelerometry[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2007, 39(9): 1502-1508. DOI: 10.1249/mss.0b013e3180a76de5.
- [17] Hansen BH, Kolle E, Dyrstad SM, et al. Accelerometer-determined physical activity in adults and older people[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(2): 266-272. DOI: 10.1249/MSS.0b013e31822cb354.
- [18] Konopka MJ, Köhler S, Stehouwer CDA, et al. Accelerometer-derived sedentary time and physical activity and the incidence of depressive symptoms – The Maastricht study[J]. *Psychol Med*, 2022, 52(13): 2786-2793. DOI: 10.1017/S0033291720004924.
- [19] Foong YC, Chherawala N, Aitken D, et al. Accelerometer-determined physical activity, muscle mass, and leg strength in community-dwelling older adults[J]. *J Cachexia, Sarcopenia Muscle*, 2016, 7(3): 275-283. DOI: 10.1002/jcsm.12065.
- [20] Park S, Park H, Togo F, et al. Year-long physical activity and metabolic syndrome in older Japanese adults: cross-sectional data from the Nakanojo study[J]. *J Gerontol Ser A*, 2008, 63(10): 1119-1123. DOI: 10.1093/gerona/63.10.1119.
- [21] Yuki A, Otsuka R, Tange C, et al. Daily physical activity predicts frailty development among community-dwelling older Japanese adults[J]. *J Am Med Dir Assoc*, 2019, 20(8): 1032-1036. DOI: 10.1016/j.jamda.2019.01.001.
- [22] Sumner J, Uijtdewilligen L, Chu AH, et al. Stepping volume and intensity patterns in a multi-ethnic urban Asian population[J]. *BMC Public Health*, 2018, 18(1): 539. DOI: 10.1186/s12889-

018-5457-y.

[23] Park S, Park SY, Oh G, et al. Association between reallocation behaviors and subjective health and stress in South Korean adults: an isotemporal substitution model[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(7): 2488. DOI: 10.3390/ijerph17072488.

[24] 李中浩, 邱芬. 回顾与展望: Actigraph 加速度计研究热点与发展趋势[J]. *福建体育科技*, 2021, 40(4): 30-35. DOI: 10.3969/j.issn.1004-8790.2021.04.007.

Li ZH, Qiu F. Review and outlook: actigraph accelerometer research hotspots and trends[J]. *Fujian Sports Sci Technol*, 2021, 40(4): 30-35. DOI: 10.3969/j.issn.1004-8790.2021.04.007.

[25] 李立明, 吕筠, 郭彧, 等. 中国慢性病前瞻性研究: 研究方法和调查对象的基线特征[J]. *中华流行病学杂志*, 2012, 33(3): 249-255. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2012.03.001.

Li LM, Lv J, Guo Y, et al. The China Kadoorie Biobank: related methodology and baseline characteristics of the participants[J]. *Chin J Epidemiol*, 2012, 33(3): 249-255. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2012.03.001.

[26] Chen ZM, Lee L, Chen JS, et al. Cohort profile: the Kadoorie study of chronic disease in China (KSCDC)[J]. *Int J Epidemiol*, 2005, 34(6): 1243-1249. DOI: 10.1093/ije/dyi174.

[27] Ladha C, Ladha K, Jackson D, et al. Shaker table validation of OpenMovement AX3 accelerometer[C]//Ahmerst (ICAMPAM 2013 AMHERST). 3rd international conference on ambulatory monitoring of physical activity and movement , 2013: 69-70.