

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-317-07

西安户外运动人群 夏季生理参数及热舒适的关联性研究

罗 薇 殷颖迪 井文强 李楚君 张 锦 李 婷 潘家辉

(西安欧亚学院人居环境学院 西安 710065)

【摘 要】 不同人群对热条件的偏好可能会有所不同,这取决于本地的气候特点。当人群从一个气候区迁移到另一个气候区时,因迁移形成的气候地域变化被作为影响人体生理参数和热舒适的重要因素。通过招募大一学生($n=61$)于2021年5月16日至5月28日在西安校园里进行户外运动。研究期间对热舒适和心率、氧饱和度等生理参数进行了调查。结果表明,非本地人的心率高于本地人,但本地人的血氧饱和度高于非本地人。本地人与非本地人在热舒适和热感觉方面存在明显差异,非本地人和本地人相比对环境的忍耐力更低,在夏季更加不耐热。对于了解已适应人群(本地人)和未适应人群(非本地人)的生理参数和热舒适都是必要的。尤其是未来在运动状态中解决热不适,预防更严重的热相关疾病提供参考。

【关键词】 户外运动;热舒适;生理参数;生理等效温度

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Research on the Correlation between Physiological Parameters and Thermal Comfort of Outdoor Exercisers in Summer in Xi'an

Luo Wei Yin Yingdi Jing Wenqiang Li Chujun Zhang Jin Li Ting Pan Jiahui

(School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Eurasia University, Xi'an, 710065)

【Abstract】 Different people may have different preferences for thermal conditions, depending on the local climate characteristics. When people move from one climate zone to another, this is considered to be an important factor affecting human physiological parameters and thermal comfort. Freshman ($n=61$) were recruited for outdoor sports on the Xi'an campus from May 16 to May 28, 2021. During the study, thermal comfort, heart rate, oxygen saturation and other physiological parameters were investigated. The results show that the heart rate of non-natives was higher than that of natives, but the blood oxygen saturation of natives is higher than that of non-natives. There are obvious differences between natives and non-natives in thermal comfort and thermal sensation. Compared with natives, non-natives have lower tolerance to the environment and are more heat-resistant in summer. It is necessary to understand the physiological parameters and thermal comfort of both the adapted population (natives) and the unadapted population (non-natives). In particular, it will provide a reference for solving heat discomfort during exercise and preventing more serious heat-related diseases in the future.

【Keywords】 Outdoor sports; Thermal comfort; Physiological parameters; Physiologically Equivalent Temperature

基金项目: 西安市社会科学规划基金项目—基于大数据技术的西安高校智慧校园空间优化策略研究 (GL59);
西安欧亚学院校级立项重点课程建设项目—工程招投标与合同管理 (2018KC001)

作者(通讯作者)简介: 罗 薇 (1996-), 女, 硕士, 助教, E-mail: wluoaj@163.com

收稿日期: 2021-08-24

0 引言

室外热舒适是评价城市环境宜居性的标准之一,这决定了市民是否倾向于花更多的时间在舒适的户外条件。随着气温升高和气候变化相关的极端热事件出现^[1-3],热适应对于适应未来更热的气候显得至关重要^[4]。热不适可以被视为更严重的热健康问题早期预警信号。

刘艳峰^[5,6]通过实地跟踪迁移人群发现非本地人的热适应随着时间与本地人差异逐渐变小。但经过一年多的迁移,行为适应仍未完全实现,证明行为热适应是一个相对缓慢的过程。罗茂辉^[7]对来自不同气候区的四组人群进行分析得到室内气候体验与居住者舒适度期望之间的相互依赖关系。Ning 等^[8]在哈尔滨进行了热历史和热适应研究,认为人们暴露在较温暖的气候条件下,会形成室内温度较高的热舒适区。曹彬^[9]通过对南北方人的调查发现,长期的室内体验会影响中性温度,从不同气候区迁移至当地需要至少适应 1 年。以上研究揭示了因迁移形成的气候地域变化对人体热舒适和热适应的影响。

大多数研究对问卷调查的受试者是随机选择的,以便包括更大的人口数量。而可能对个体差异使确定受试者的热适应和他们对气候条件的感知忽略。此外,很少有室外研究涉及严寒地区和寒冷地区的特定人群,从而跟踪进行生理健康要素和热舒适性的关联研究。本研究旨在探讨本地人与非本地人的室外热舒适以及生理因素之间的关系。我们以在西安校园参加户外锻炼的大一学生作为对象,这些学生来自严寒地区和寒冷地区的气候背景。由于这些学生穿着相同的衣服,进行相同的活动,行为适应的作用被最小化,从而将重点放在生理和热舒适的作用上。在理解不同人群对气候变化的适应性时,需要考虑包括热感觉和热舒适的心理因素和生理参数。通过此次研究,了解本地人和非本地人在寒冷地区的生理性和热舒适的差异性,为未来解决不同人群在夏季户外运动的热不适和相关热疾病提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区域

西安属于寒冷地区,气候温和,四季分明。夏

季炎热多雨,高原地区夏季较凉爽,降水量相对集中,一年内最大降水量一般出现在 6、7、9 月份^[10]。为了保证连续测量期间不受降雨的影响,也能为未来夏季学生体育锻炼提供依据。选择夏季五月作为研究周期,根据 2010–2019 年的数据采集,五月平均最高的气温为 33℃,五月的平均相对湿度为 70%,五月的平均月风速为 1.49m/s。

1.2 研究对象

我们招募了 61 名人居环境学院大一的学生在操场进行户外运动。其中依照学生的家乡将他们分为本地学生和非本地学生。同时我们使用建筑气候划分标准来定义中国的建筑气候区,如图 1 所示。在本次研究中,本地学生是指来自 b 区陕西省的学生,其他来自 a 区和 b 区的学生则属于非本地学生。其中,来自 a 区的学生由黑龙江(6%)、内蒙古(5%)、河北(5%)和新疆(4%)四个地域组成,来自 b 区的学生中,陕西本地人占到 51%,其余城市分别来自天津(9%)、甘肃(9%)、河南(5%)、山西(4%)和北京(2%)。在为期 12 天的体育锻炼中,学生需要每天参与我们的测试。同时图 1 显示了户外运动场地在学校中的位置。



图 1 中国的建筑气候区以及研究地区位置

Fig.1 China's building climate zone and location of the study area

1.3 现场数据采集



图 2 学生户外运动照片

Fig.2 Outdoor sports photos of students

图 2 显示了从 2021 年 5 月 16 日至 5 月 28 日进行的户外运动过程的照片。测量过程中选择下午 4 点至 6 点记录学生的活动和生理参数。活动类型包括站立、走路和跑步, 它们的代谢率 (MR) 分

别对应站立 (1.2 MET)、走路 0.9m/s (2.6 MET) 和 2m/s 跑步 (3.8 MET)。1 小时的活动结束后, 学生们会停下来休息。由于运动不能中断, 学生们在运动后休息我们再进行调查。

当学生结束运动的 5min 内, 我们使用指夹式脉搏血氧仪以及 T31 手腕式电子血压仪来测量学生的脉搏以及血浆饱和度如图 3 所示。在运动场地中, 我们使用室外气象站分别对空气温度、相对湿度、表面温度、黑球温度、风速、可吸入颗粒物等参数进行每 10min 一次的数据采集, 测点距地面高 1.5m (选取行人层面高度)。根据 ISO 7726 1998^[11] 有关要求进行仪器选择, 并符合测试的准确性和敏感性, 仪器具体参数如表 1 所示。



图 3 (a) 装有测量气象参数仪器的室外气象站 (b) 测量人体生理参数的血氧仪和电子血压仪 (c) 学生现场生理测量

Fig.3 (a)Outdoor weather station equipped with instruments for measuring meteorological parameters; (b)Oximeter and electronic blood pressure meter for measuring physiological parameters of human body; (c)On-site physiological measurements of students

表 1 仪器型号与参数

Table 1 Instrument model and parameters

测量参数	测量仪器	仪器精度	测量范围	采集方式
血浆饱和度	指夹式脉搏血氧仪	0%~100%	±2%	手动
心率、血压	T31 手腕式电子血压仪	压力: ±3mmHg 脉搏数: ±5%	压力: 0mmHg~299mmHg 脉搏数: 40 次/分~180 次/分	手动
风速参数	——	± (0.2+0.03V) m/s, V: 风速	默认 0~30m/s (0~60m/s 可定制)	自动
风向参数	——	±1°	8 个指示方向/0~360°测量	自动
PM2.5/PM10 参数	室外气象站	0.2µm	0.0~999.9µg/m³; 0~20µg/m³	自动
温湿度参数	——	——	温度量程: -40~+125° C (-40~257°F)	自动
表面温度	非接触式红外测温枪	±2°C	湿度量程: 0~100%RH	手动

在热指标中, 最常用的室外热指标是生理等效温度 (PET) 和通用热气候指数 (UTCI)。PET 被定义人体在典型的室内环境 (无风和太阳辐射) 下的热平衡的空气温度, 其核心和皮肤温度与待评估的室外条件相同。PET 综合考虑了行人高度 (如地

面上 1.1 米) 的气象参数和人体能量平衡 (如衣服隔热和内部热量产生) 的影响^[12]。本文选择 PET 作为我们研究的热指标, 使用 RayMan 通过输入空气温度、相对湿度、风速、太阳辐射以及新陈代谢率计算 PET。

1.4 热舒适调查

调查中共计发放问卷 511 份，回收有效问卷共 495 份。为了使问卷数据更加直观有效，此次实验采用实际测量和问卷调查相结合的手段进行。问卷分为两个模块，第一模块为受试者的基本信息，包括他们来西安前的身高、体重、出生地、居住地等信息。在进行室外活动后，第二模块受试者需要对自己的热感觉状况、热接受度及对环境期望变化。其中热感觉评判采用 ASHRAE 55-2013^[13] 的 7 级热感觉标尺，即：冷(-3)、凉(-2)、稍凉(-1)、中性(0)、稍暖(+1)、暖(+2)、热(+3)。同时还询问了他们的湿度、风感、的评价。在测试点停留超过 20min 后采用线上填写的方式填写。

2 结果分析

2.1 室外数据

表 2 显示了室外气象站在为期 12 天的下午训练期间的平均天气情况。由于 2021 年 5 月 22 日下雨，当天的运动被取消。在运动期间，温度和湿度的平均值分别为 35.0℃和 35.4%。风速从 0.50m/s 到 1.16m/s 不等。PM_{2.5} 和 CO₂ 浓度的平均值分别是 11.3μg/m³和 457.9ppm。

表 2 2021 年 5 月下旬锻炼期间
(下午 2 点至 5 点)的平均气象条件

Table 2 Average meteorological conditions during the afternoon exercise period (2pm to 5pm) in May 2021

日期 (2021/5)	温度	相对湿度	风速	PM2.5	二氧化碳
16	26.8	61.8	0.94	17.1	17.1
17	28.7	30.0	0.67	7.2	7.2
18	30.0	28.8	0.88	15.1	15.1
19	27.0	43.3	0.56	4.6	4.6
20	30.6	58.4	0.28	4.8	4.8
21	26.6	50.7	0.16	28.7	28.7
23	37.7	32.3	0.54	14.5	14.5
24	32.8	26.6	0.44	5.1	5.1
25	26.1	41.9	0.14	12.5	12.5
26	33.5	24.9	0.51	8.2	8.2
27	31.5	33.1	0.29	7.8	7.8
28	31.7	22.9	0.53	6.7	6.7
平均值	30.2	37.9	0.5	11.0	11.0

2.2 人体舒适性及生理性分析

2.2.1 不同人群的热感觉和热舒适

当地居民和外来人口对热的感知可能会因他们过去的经历而不同，因此首先对其进行了分析。如图 4 所示，热感觉投票主要分布在中性、稍热和稍冷，其中中性占比最高，分别为 53%和 37%。此外，由于测量期间室外空气温度偏高，只有少数测试者感到凉爽 (3.6%和 3.7%)。而非本地人比本地人热感觉整体偏热，其中 7.1%的本地人和 11.1%的非本地人的投票给了“热”。假设热感觉投票“暖和”和“热”对应的是“不适感”，本地人人群的不适感水平为 14.2%，非本地人群的不适感水平为 29.6%，可以看出非本地人与本地人相比更加不耐热。

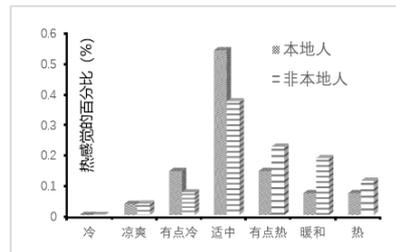


图 4 不同人群的热感觉投票百分比分布图

Fig.4 Percentage distribution of thermal sensation voting of different people

图 5 为热舒适 TCV 的百分比分布图，值得注意的是，“适中”的投票率在夏季占主导地位，其中本地人和非本地人占比分别为 50%和 40%。其中，本地人中在热舒适的投票中最常见的是“适中”（50%）、“有一点舒服”（23.7%）和“舒服”（13.2%），而仅有 2.6%的人感觉不舒服。而非本地人在热舒适的投票中最常见的是“适中”（40%）、“有一点舒服”（20%）和“有一点不舒服”（20%）。此外，“暖和”和“热”投票被认为是造成低舒适度的原因。因此，非本地人与本地人相比不舒适性偏高。不同的气候背景和热历史都会影响人们的热感觉^[14,15]。

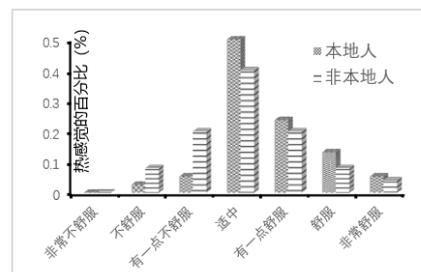


图 5 热舒适投票的百分比分布

Fig.5 Percentage distribution of thermal comfort voting

2.2.2 平均热感觉与中性 PET

为了得到不同人群的室外中性 PET, 进一步分析了 PET 与 MTSV 的关系。以 0.5℃为间隔将 PET 分为组, 统计分析每组平均热感觉 MTSV 与生理等效温度 PET 的平均值, 二者之间进行线性回归。本地人与非本地人的 MTSV 与 PET 的关系如图 6 所示, 线性回归方程如表 3 所示。

表 3 室外 PET 与平均热感觉的线性回归方程

Table 3 Linear regression equation of outdoor PET and average thermal sensation

本地人	$MTSV=0.635*PET-15.981 (R^2=0.80)$
非本地人	$MTSV=0.7607*PET-18.98 (R^2=0.84)$

调查期间 PET 范围从 23℃~27.5℃之间波动, 热感觉也产生了明显变化。TSV 拟合方程随室外温度变化的回归系数, 表明了人体热感觉对温度变化的敏感度, 比较显示非本地人比本地人的剪度度高。由于西安的夏季室外温度较高, 居住在城市里的人们已经适应了炎热干燥的室外环境, 他们对夏季的条件不那么敏感。因此也证明了热适应在本地人中的存在。其他原因例如人群对环境的适应力、人群生活习惯等。

人们既不感到温暖也不凉快的温度被定义为中性温度, 可以直接反应热感觉舒适时的热需求^[16,17]。通过将 $MTSV=0$ 代入上述方程, 得到本地人与非本地人人群的中性 PET 分别为 25.17℃和 24.95℃。从图 7 中可以看到, 受试者中本地人与非本地人的比例相当, 非本地人中全部来自中国北方, 其中 24%的受试者来自与严寒地区, 其余 25%和西安同属于寒冷地区。由此得到非本地人和本地人相比, 对环境的忍受力更低, 在夏季更加不耐热, 中性 PET 比本地人低 0.22℃。值得注意的是其中有 1%的测试者来自于少数民族, 他们的剪感性尚未考察, 未来可以针对民族背景进行进一步的研究。

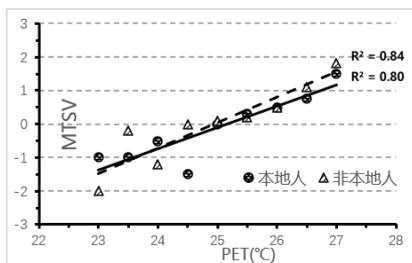


图 6 室外 PET 与平均热感觉的关系

Fig.6 Relationship between outdoor PET and average

thermal sensation

此外, 从图 6 可以看出, 当 PET 值相同时, MTSV 的变化量随着 PET 值的增加而增大。这意味着不同人群在相同的 PET 值下, 尤其是在微气候条件较热的情况下, 由于热适应本地人与非本地人产生不同热感觉的剪异性逐渐增大。

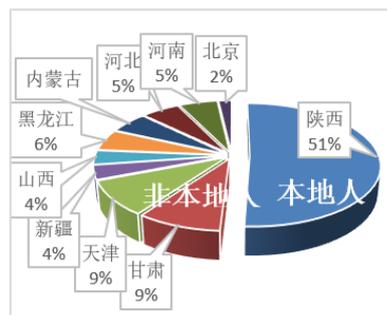


图 7 测试者中不同地域的人群分布图

Fig.7 Population distribution of subjects in different regions

2.2.3 心率与热舒适

因为生理和心理的剪异, 不同人在相同的工作条件中, 舒适感和热感觉都不一样。通常是部分人觉得正好, 而其他入却觉得偏冷或偏暖。因此有必要研究不同热舒适和热感觉下的生理参数的变化。通过 SPSS 软件分析得到心率和血氧饱和度分别与舒适感和热感觉存在显著相关。心率在不同的热舒适下的显著性分析结果如表 4 所示。

表 4 热舒适和心率的相关性

Table 4 Correlation between thermal comfort and heart rate

	热感觉	血氧饱和度 (SpO2%)
热感觉	1	
血氧饱和度 (SpO2%)	0.485*	1

*表示在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著 ($P<0.05$)

从图 8 中可以看到, 人群在户外运动过程中心率变化趋势呈“V”形。在本次研究中, 当学生从冷不舒适到舒适时, 本地人和非本地人都有下降的趋势, 分别由 84.2 下降到 81.25, 由 89.73 下降到 86。从舒适到热不舒适时, 心率的变化再次回升, 分别从 81.25 和 86, 上升到 89 和 93。由于对环境的剪感性更高, 在相同环境下非本地人比本地人的心率整体偏高, 但在心率的变化趋势上, 两者没有明

显的差异。在本次研究中，处于不舒适的状态分别是心率大于 81.25 和 86 的本地人与非本地人。同时，心率的变化幅度从中性状态到热不舒适时，要大于从中性状态到冷不舒适的状态，证明人体处于极端热环境中对心率的影响较冷环境更为明显。

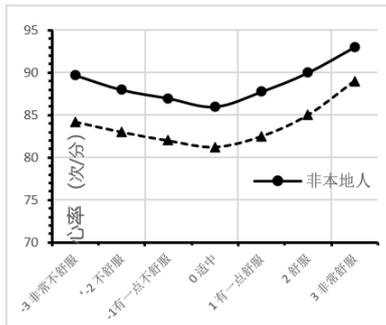


图 8 心率和热舒适的关系图

Fig.8 Relationship between heart rate and thermal comfort

2.2.4 血氧饱和度与热感觉

血氧饱和度在不同的热感觉下的显著性分析结果见表 5，从图 9 中可以看到，当热感觉由冷变热时，皮肤的血氧饱和度随着热感觉的升高而降低，本地人和非本地人分别由 99.12%和 98.53%降低至 96.21%和 95.58%，非本地人的下降幅度比本地人仅高 0.04%。由于本地人对于环境长期的适应力，使得其血氧饱和度整体偏高。并且在“冷”或“热”的极端环境中，两者之间的差异越大，其中在“热”环境中更为明显，相差 0.63%。但是对于舒适度，血氧饱和度的值与其并无直接关系。在本次测试中，本地人与非本地人分别高于 97.25 和 97.04 时，人体处于偏冷的状态。当小于此临界值时，则是偏热。当室外温度升高，氧气与血红蛋白的粘合度变低，血氧饱和度降低。反之则升高。因此，高温环境对血氧饱和度有明显的影 响，热感觉可以通过血氧饱和度的变化来体现。

表 5 热感觉和血氧饱和度的相关性

Table 5 Correlation between thermal sensation and oxygen saturation

	热舒适	脉搏 (单位: 次/分)
热舒适	1	
心率 (单位: 次/分)	0.567*	1

*表示在 0.05 级别 (双尾)，相关性显著 ($P < 0.05$)

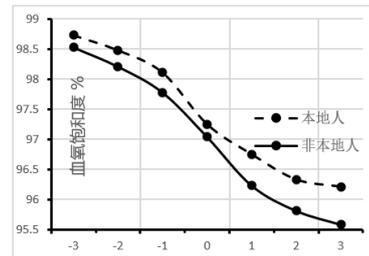


图 9 血氧饱和度与热感觉的关系图

Fig.9 Relationship between blood oxygen saturation and thermal sensation

3 结论

本研究考察了 2021 年 5 月 16 日至 5 月 28 日运动期间不同人群的热舒适以及生理健康对其的影响。调查问卷及生理参数 (心率, 血氧饱和度) 用来评估这些因素。

(1) 在夏季测试中，非本地人比本地人热感觉整体偏热且不舒适性偏高。结果表明，本地人比非本地人更适合炎热干燥的气候地区的室外热环境。

(2) 在相同的 PET 条件下，本地人与非本地人的热感觉、热舒适存在差异。非本地人对温度变化比本地人的敏感度高，对环境的忍受力更低，且中性 PET 比本地人低 0.22℃。

(3) 生理参数受环境舒适度的影响，尤其是从舒适到不舒适变化时。心率的快慢可作为指标来衡量人体热舒适。血氧饱和度虽然与热舒适无直接的关系，但与热感觉关系密切。最终得到非本地人的心率高于本地人，但本地人的血氧饱和度高于非本地人。

参考文献:

- [1] P Stott. How climate change affects extreme weather events[J]. Science, 2016,352(6293):1517-1518.
- [2] G A Meehl, C Tebaldi. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century[J]. Science, 2004,305(5686):994-997.
- [3] 田国华,狄育慧,王丽娟.稳态环境耐热与非耐热人体热反应实验研究[J].制冷与空调,2018,32(2):103-108.
- [4] E G Hanna, P W Tait. Limitations to thermoregulation and acclimatization challenge human adaptation to

- global warming[J]. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*, 2015,12(7):8034-8074.
- [5] Y Liu, Y Dong, C Song, et al. A tracked field study of thermal adaptation during a short-term migration between cold and hot-summer and warm-winter areas of China[J]. *Build. Environ.*, 2017,124:90-103.
- [6] Y Liu, Y Dong, C Song, et al. Dynamic process of behavioral adaptation of migrants with different thermal experiences: a long-term follow-up field survey[J]. *Energy Build.*, 2020,207:109605.
- [7] M Luo, Z Wang, G Brager, et al. Indoor climate experience, migration, and thermal comfort expectation in buildings[J]. *Build. Environ.*, 2018,141:262-272.
- [8] H Ning, Z Wang, X Zhang, et al. Adaptive thermal comfort in university dormitories in the severe cold area of China[J]. *Build. Environ.*, 2016,99:161-169.
- [9] Cao B, Zhu Y X, Ouyang Q. Study on the effects of local climate and life style to thermal comfort in China. *Proceedings of Indoor Air 2012*[C]. Austin, TX, USA.
- [10] 宋令勇,宋进喜,张文静.西安地区降水时空分布及变化规律分析[J].*干旱区资源与环境*,2010,24(1):85-89.
- [11] Ergonomics of the thermal environment-Instruments for measuring physical quantities:ISO7726[S]. International Organization for Standardization, Geneva, 1998:156-158.
- [12] A Matzarakis, H Mayer, MG Iziomon. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature[J]. *Int. J. Biometeorol*, 1999,43(2):76-84.
- [13] ASHRAE. Handbook of fundamentals[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2001.
- [14] 郑武幸. 气候的地域和季节变化对人体热适应的影响与应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [15] 林宇凡,杨柳,任艺梅,等.中国南北人群在中性环境下的生理适应性和主观评价[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016,38(5):130-137.
- [16] 陈昕. 哈尔滨室外人群热舒适动态变化规律及预测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [17] 潘黎. 基于人体生理参数的清醒和睡眠状态的热舒适研究[D].上海:上海交通大学,2012.

(上接第 316 页)

- [11] 杨安,胡堰,周亮,等.基于信息流和状态流融合的工控系统异常检测算法[J].*计算机研究与发展*,2018,55(11):192-202.
- [12] 孙连海,卢颖.基于多变量自动回归的评分数据异常检测算法[J].*计算机工程与设计*,2018,39(6):1629-1632,1652.
- [13] 李超,赵林海,刘伟宁.基于 Canny 算子的转辙机缺口自动检测算法[J].*铁道学报*,2018,40(10):85-91.
- [14] 陈勇,李胜男,张丽,等.基于改进 Apriori 算法的智能变电站二次设备缺陷关联性分析[J].*电力系统保护与控制*,2019,47(20):135-141.
- [15] 许耀华,尤扬扬,胡梦钰,等.基于 SAOR 的 Massive MIMO 系统信号检测算法[J].*数据采集与处理*,2020,35(1):139-146.