



# 运动员汗液分析技术进展

陈刚<sup>1</sup>,叶心明<sup>2</sup>,王兴<sup>3</sup>

**摘要:** 运动员训练和比赛时出汗导致水分和电解质等成分大量流失,并排出乳酸、尿素、肌酸、肌酐等代谢产物到汗液中。通过汗液分析可快速了解运动时运动员身体状况、机体代谢情况以及运动时机体的适应性,在运动员选材、日常体育训练和体能恢复等方面具有十分重要的实际意义。本文综述了近来运动员汗液分析技术的进展,力求全面反映运动员汗液分析的最新进展。

**关键词:** 汗液分析;可穿戴设备;体育运动

中图分类号:G804 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2019)05-0079-06

DOI:10.12064/ssr.20190510

## Progress in Sweat Analysis for Athletes

CHEN Gang<sup>1</sup>, YE Xinming<sup>2</sup>, WANG Xing<sup>3</sup>

(1. School of Pharmacy, Fudan University, Shanghai 201203, China; 2. School of Sports Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 3. School of Physical Education and Training, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

**Abstract:** During the training and competition of athletes, a great amount of water and electrolytes are expelled from the body in the form of sweat. A series of important metabolites such as lactic acid, uric acid, urea, creatinine, and creatine are excreted into sweat. Based on sweat analysis, we can have an immediate insight into the physical condition of sportsmen during sports, body metabolism as well as the adaptability of the body in exercise. Sweat analysis has very important practical significance for athlete selection, daily physical training and physical recovery. This paper reviews the technological progress in sweat analysis for athletes.

**Key Words:** sweat analysis; wearable devices; athletic sports

## 0 前言

出汗是人体正常的生理活动,可分为主动和被动出汗,汗腺分泌的液体称为汗液。被动出汗是因天气闷热或心情烦躁而引起的,通过水分蒸发可带走体内热量,维持体温在正常范围内。而主动出汗是人体由于主动运动引起的出汗,不仅有利于散发热量,还能带走体内因运动而产生的垃圾<sup>[1]</sup>。

正常人体汗液比重在 1.002~1.003 g/L 范围内,其中 98%~99% 的成分为水,pH 值范围为 4.2~7.5,氯化钠含量约为 3 g/L。汗液化学成分主要有尿素、乳酸、葡萄糖、尿酸、肌酸、肌酐、氨基酸和电解质(钠离子、钾离子、钙离子、镁离子、氯离子和无机磷)等。运动员训练和比赛时由于出汗,水分和电

质等成分大量流失,并排出人体代谢产物,故对汗液中上述有关物质进行检测可了解运动时运动员身体状况、机体代谢情况以及运动时机体的适应性,在运动员选材、日常体育训练和体能恢复等方面具有十分重要的实际意义<sup>[1-3]</sup>,汗液分析可为运动员选拔、日常体育运动训练和指导体能恢复等提供科学依据和手段。

运动员汗液分析通常采用生物传感器、离子色谱、质谱、毛细管电泳、液相色谱和气相色谱等分析手段。对于生物传感器,每种传感器只能检测一种指标;而质谱、毛细管电泳、液相色谱和气相色谱分析时间在数十分钟,仪器体积大,难以满足运动现场快速分析的需要<sup>[1-3]</sup>,于是,研发快速简便的便携式运动员汗液分析仪器和检测技术得到了越来越广泛的

收稿日期:2019-06-14

基金项目:上海市体育局科技综合计划项目(2016Z021)。

第一作者简介:陈刚,男,博士,教授。主要研究方向:生物医药分析。E-mail:gangchen@fudan.edu.cn。

作者单位:1. 复旦大学药学院,上海 201203;2. 华东理工大学体育科学与工程学院,上海 200237;

3. 上海体育学院体育教育训练学院,上海 200438。



关注。近年来,随着可穿戴设备和智能手机的普及和发展,其在运动员汗液分析领域也得到了国内外体育和分析科学界广泛关注。

作为一种无损伤的非侵入式分析方法,汗液分析研究已成为体育运动行业和相关领域的研究热点,有关新技术层出不穷。本文综述近来运动员汗液分析技术的新进展。

## 1 汗液收集和处理

汗液的收集可分全身收集法和局部收集法<sup>[4]</sup>,前者通过运动后全身冲洗或提取衣物浸泡液采集汗液样本,而后者主要使用滤纸片、纱布、海绵垫、臂袋等收集胸、臂等部位分泌的汗液。

杨则宜等建立臂汗收集法,汗液用聚乙烯袋包裹手臂收集汗液,收集前清洗手臂并擦干。收集的运动后汗液经离心和酸化后用原子吸收分光光度计测定其中钾、钠、钙、镁、铁等离子的浓度,并通过凯氏定氮法检测含氮量。结果表明不同训练水平运动员汗液中无机离子浓度差异不大,钾、钠、钙、镁、铁离子的平均含量分别为(324±82.4) mg/L、(1 007±350) mg/L、(102±44) mg/L、(12.9±8) mg/L和(634±246) mg/L,氮的浓度为(537±143) mg/L<sup>[4]</sup>。陈柏华等研制了一种电渗汗液滤纸收集片<sup>[5]</sup>,采用电渗毛茛芸香碱的方法诱导汗液分泌,将定量滤纸贴于皮肤上,包裹聚乙烯薄膜并套上护腕套,约半小时后将收集有汗液的滤纸置于玻璃瓶中,提取后采用火焰光度法测定汗液中的钠离子。江西赣州地区人体汗液研究小组建立了汗液刮取收集技术<sup>[6]</sup>,收集运动后或浴后汗液作为试样,样品汗液由是头部和躯干部位刮取。采用原子吸收光度法、火焰光度法和比色法检测了汗液中钾离子、钠离子、氯离子、氨基酸、葡萄糖、尿素、肌酸、肌酐、尿酸等指标,但仪器操作复杂,难以用于现场检测。

## 2 汗液分析技术

汗液快速分析技术不仅可用于竞技体育中运动员汗液分析,在全民健身领域也有巨大的需求,通过非侵入式的汗液分析可快速了解自身健康水平和运动效果,并可调节控制运动量等,以促进全面提高国民体质和健康水平。

### 2.1 运动员汗液电解质的检测

汗液电解质分析对了解运动员电解质流失和指导电解质的补充具有十分重要的实际意义。吴潇男等采用等离子体发射光谱分析了运动员汗液中尿素、乳酸、钠、钾和氯的含量,探究湿热环境下运动对

汗液中这些成分的影响。发现这些成分在训练的第6天降至最低值,随后乳酸水平趋于平稳,而其他成分水平出现明显的回升,说明湿热环境下习服训练适应时间至少需6 d<sup>[7]</sup>。Dam在涤纶膜上集成了参比电极和氯化银检测电极,制成了可穿戴的汗液检测贴片,可用于运动员汗液中氯离子的连续测定,具有响应快和灵敏度高的优点,连续检测一周传感器电位基本稳定<sup>[8]</sup>。

阮芳铭等使用棉质短裤、海魂衫、棉质长统袜子和毛巾等收集训练中的运动员汗液用于电解质检测。采用江苏电分析仪器厂生产的钾电极、钠电极、氯电极检测了汗液中的钾、钠和氯离子,结果令人满意。由于采用电位法,可微型化,适合研制可穿戴电解质检测装置<sup>[9]</sup>。顾星等将汗液中的钠、氯、钙、钾无机离子显色后采用分光光度法进行检测,获得了满意的结果,但操作复杂,不适合运动员汗液分析的现场快速检测<sup>[10]</sup>。Nyein等制备了一种基于柔性硅橡胶的可穿戴微流控汗液检测贴片,具有螺旋状的微流控通道,可用于汗液的收集和检测,通过集成电位传感器,可用于运动员和临床病人汗液中氢离子、钠离子、钾离子和氯离子的快速检测<sup>[11]</sup>。

### 2.2 运动员汗液乳酸和酸度的检测

乳酸是运动中体内葡萄糖代谢产生的中间产物。由于运动员长期处于运动量较大的状态,氧气供应不足,导致产生的乳酸不能在短时间内进一步分解,形成无氧代谢,产生的乳酸在体内形成堆积,会引起局部肌肉的酸痛。运动员经过一定期限的训练,机体逐渐适应运动的强度,乳酸堆积及其导致的肌肉酸痛现象可获得缓解。故检测运动员汗液中乳酸可间接了解运动员体内乳酸水平,了解运动员身体情况和训练后身体恢复情况,可用于训练指导、训练方案制定以及运动员选材。

Anastasova等在柔性的通道内植入乳酸安培酶传感器、钠离子选择电极、酸度微电极和温度传感器,制作可穿戴贴片,可检测运动员运动时汗液中的乳酸、钠离子、酸度和体温<sup>[12]</sup>。Biagi等采用液相色谱联用紫外检测技术分离检测了运动员汗液中的乳酸和丙酮酸,方法回收率和准确度令人满意<sup>[13]</sup>。Kondoh等采用液相色谱检测了运动员运动前后汗液中的D-乳酸盐、L-乳酸盐、丙酮酸和甲基乙二醛,发现运动后有关物质水平大幅上升<sup>[14]</sup>。

### 2.3 运动员汗液葡萄糖的检测

运动员汗液中葡萄糖反映运动员血糖水平、机



体代谢和运动时机体的适应性, 对其进行快速检测在体育实践中具有十分重要的实际意义。

Ryan 等将含有胆碱能受体激动剂的凝胶电极对通过电离子渗入刺激汗腺分泌汗液, 收集的汗液通过集成在涤纶膜上的氯离子选择电极和钠离子选择电极检测汗液中的钠离子和氯离子<sup>[15]</sup>。如图 1 所示, 全部传感器、汗液刺激释放电极对和电路都集成在一个硅胶腕带里, 可用于运动员汗液实时检测。

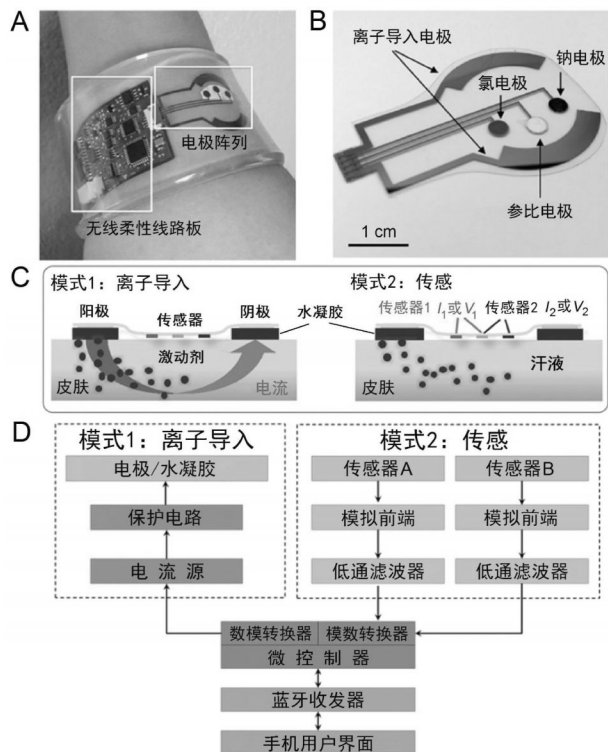


图 1 可穿戴汗液葡萄糖检测装置实物照片和工作示意图

Figure 1 Photograph of A Wearable Sweat Glucose Monitoring Device and Its Working Diagram

Munje 等在聚酰亚胺膜上制作金电极对, 覆盖氧化锌涂层作为阻抗传感元件, 修饰葡萄糖氧化酶后可用于汗液中葡萄糖的检测。由于聚酰亚胺膜为柔性膜, 可紧贴皮肤实时检测<sup>[16]</sup>。Lee 等研制了一次性可穿戴汗液葡萄糖检测装置, 采用普鲁士蓝修饰葡萄糖氧化酶检测技术, 具有多级透皮药物递送模块, 可用于运动员汗液中葡萄糖检测<sup>[17]</sup>。

## 2.4 运动员汗液中肌酐、肌酸、铵和尿素等含氮物质测定

汗液中肌酐、肌酸、铵和尿素等小分子含氮物质的水平可揭示运动时运动员机体的代谢水平和机体适应性, 为训练指导提供依据。雷志平等采用二乙酰一肟分光光度法测定了足球运动员大运动量训练后

汗液中尿素氮的含量, 并比较了汗液尿素氮和尿液尿素氮排泄量的关系, 为研究运动排汗对蛋白质代谢的影响和蛋白质营养相关问题提供依据<sup>[2]</sup>。

Huang 等采用比色法分析了运动员汗液中的肌酐、肌酸、尿酸和尿素, 可为有关非蛋白氮的分析提供简便快速的方法<sup>[18]</sup>。Yokoyama 等采用液相色谱联用质谱检测技术分析了运动员汗液中的尿素、乳酸和几种氨基酸, 获得了满意的结果, 具有灵敏度和准确度高的优点<sup>[19]</sup>。

## 2.5 运动员汗液中蛋白的测定

运动员汗液中的蛋白质的检测可反映运动时因出汗引起的蛋白流失情况和相关疾病, 但通常情况下汗液中蛋白几乎检测不出。Yu 等采用蛋白组学和肽组学技术, 结合质谱和酶解分析和鉴定了人体汗液中 861 个独特的蛋白和 32 818 个内分泌多肽, 首次证明部分汗液多肽的抗菌活性<sup>[20]</sup>。Marshall 等采用二维凝胶电泳和银染法检测了运动员尿液中的多种蛋白<sup>[21]</sup>, Corrie 等介绍了一系列用于汗液蛋白分析的生物传感器<sup>[22]</sup>, 均获得满意的结果。

## 2.6 运动员汗液中氨基酸的测定

运动员汗液中存在氨基酸, 其水平可反映运动员身体健康和机体代谢状况。Hirokawa 等采用毛细管电泳结合紫外检测技术分析了运动员汗液中的赖氨酸、鸟氨酸、精氨酸、精胺以及钾、钠、钙、镁 4 种离子。该方法具有样品用量少和快速简便的优点<sup>[23]</sup>。

邱仞之等用防毒服收集全身汗液, 采用氨基酸自动分析仪测定了高湿热环境热习服训练运动员汗液中的赖氨酸、苏氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸、蛋氨酸、脯氨酸、异亮氨酸、丝氨酸、组氨酸、酪氨酸、甘氨酸、天冬氨酸、胱氨酸、精氨酸、丙氨酸、谷氨酸, 发现汗液训练后汗液氨基酸除蛋氨酸、胱氨酸和苯丙氨酸略微下降外, 其它氨基酸水平均显著降低<sup>[24]</sup>。陆鼎一等通过聚酰胺薄膜层析法测定了运动员汗液中甘氨酸、丙氨酸、丝氨酸、苏氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、脯氨酸、组氨酸、色氨酸、酪氨酸, 具有简便快捷的特点, 获得了满意的检测结果<sup>[25]</sup>。Calderon-Santiago 等采用液相色谱联用质谱检测了运动员汗液中 18 种氨基酸及其代谢产物, 可为运动员汗液分析和疾病诊断提供简便快速的分析方法<sup>[26]</sup>。

## 2.7 运动员汗液中乙醇的测定

乙醇的测定分为物理法和化学法。物理法包括气相色谱法、酒精计法、密度瓶法和折射计测定法



等。化学法有重铬酸钾比色法、碘量滴定法、莫尔氏盐法等。运动员由于酒后锻炼或服用藿香正气水、腐乳等,汗液中会出现乙醇。同时,检测运动员汗液中乙醇可评价运动员的代谢水平。徐学笛通过气相色谱对酒后人体分泌的汗液进行了分析,采用氢火焰检测器和顶空进样分析,成功测定了汗液乙醇含量。此方法具有测定结果准确和操作简便快速的特点<sup>[27]</sup>。Selvam 等研制了一种基于金电极和氧化锌平板电极的可穿戴传感器,可用于运动员汗液中乙醇和乙基葡萄糖醛酸苷的连续电化学检测<sup>[28]</sup>。

## 2.8 运动员汗液中尿酸的测定

尿酸是人类嘌呤类化合物分解代谢的最终产物,可从汗液中排出,反应运动员健康和机体代谢情况。Calderon-Santiago 等采用液相色谱质谱联用技术检测了汗液中尿酸和有关代谢物的浓度获得了满意的结果,但由于仪器体积较大,不便于现场检测<sup>[26]</sup>。Sugase 等采用液相色谱检测了人汗液中乳酸、尿酸、黄嘌呤和酪氨酸,浓度分别为 154 mmol/L、150 μmol/L、225 μmol/L 和 2.25 mmol/L<sup>[29]</sup>。

## 2.9 运动员汗液中维生素的测定

张工等建立了一种不经预先分离可同时用荧光光度法测定人体汗液中维生素 B<sub>1</sub> 和维生素 B<sub>2</sub> 的方法<sup>[30]</sup>,用自制汗袋收集汗液,优化了样品制备和测试条件,对实际人体汗样进行了含量测定,回收率均在 75% 以上。

## 2.10 运动员汗液中重金属离子和微量元素的测定

一些劣质的运动员服装常存在重金属离子超标的问题,危害运动员健康。衣物直接与人体接触,可通过检测汗液中重金属离子的含量,了解运动员体内的重金属水平。王斌等采用电感耦合等离子体质谱法测定人体汗液中铅、铬、铜和汞等重金属离子,解决了汗液中高盐基体对检测结果的干扰,获得了优化的样品制备和测试条件,该方法检出限低、精密度高,回收率为 90.5%~106%<sup>[31]</sup>。

江荣等采用原子吸收分光光度法检测了运动员汗液中钾、钠、钙、镁、铜、锌和铁等微量元素,分析了高湿热环境下体育训练对人体汗液中微量元素流失的影响<sup>[32]</sup>。结果表明,在高湿热环境下进行 10 d 的体育锻炼可提高人体对热负荷的耐受能力。

## 2.11 汗液中咖啡因等嘌呤类物质的测定

国际上有些运动员常通过服用兴奋剂提高体育运动成绩,为了躲避尿检常服用咖啡因、茶碱等利尿

药物,通过检测运动员汗液中的咖啡因等嘌呤类物质及其代谢产物可监督滥用兴奋剂等问题。

Tsuda 等采用气相色谱-质谱法检测了样品中的咖啡因,获得了满意的结果<sup>[33]</sup>。张婷等用液相色谱-质谱法测定了指纹汗液中咖啡因及其代谢物副黄嘌呤的含量<sup>[34]</sup>。用滤纸提取指纹汗液后,采用正离子检测模式,咖啡因和副黄嘌呤与其峰面积呈良好线性关系,方法的检出限分别为 0.3 纳克/片和 1.7 纳克/片。

## 2.12 免疫法检测汗液中乙肝病毒

聂军等首次采用免疫电泳在汗液中检出了乙型肝炎表面抗原 (HBsAg) 和乙肝病毒脱氧核糖核酸 (HBV DNA),说明 HBV 可能随乙肝病毒携带者的汗液排出<sup>[35]</sup>,未见有前人报告,为汗液中存在 HBV 提供形态学的证据。他们还采用斑点分子杂交试验检测了 HBsAg 携带者汗液中的 HBV DNA,结果表明 HBV 可随汗液排出,汗液为传播乙肝病毒的媒介之一<sup>[36]</sup>。

## 2.13 汗液中芳胺类物质的测定

运动服常用偶氮染料染色,在户外光辐射条件下,其可发生光致还原反应生成芳香胺类物质,欧盟已规定禁止在纺织产品中使用可降解产生 22 种致癌芳胺类物质的偶氮染料。由于运动服与人体直接接触,可通过检测运动员汗液中芳胺类物质了解运动服染料对运动员的危害情况。代喜斌等采用纤维膜三相液相微萃取技术对汗液基质中的苯胺、对氯苯胺、邻甲苯胺、对硝基苯胺进行了富集<sup>[37]</sup>。将富集的样品直接进行毛细管电泳测定,检出限为 1~10 μg/L。

## 2.14 汗液中药物及其代谢产物的测定

运动员服药后,药物经吸收、分布、代谢等体内过程,原型药物和代谢产物可经汗液排出,可通过汗液分析间接了解运动员的服药信息。张文骥等建立汗液中美托洛尔和 α- 羟基美托洛尔的提取与检测方法<sup>[38]</sup>。汗液样品经提取和处理后采用液相色谱仪串联质谱仪检测,结果表明运动员口服 25 mg 美托洛尔 3~15 h 后仍可在汗液中检出原药及代谢物。

## 2.15 可穿戴汗液分析技术

随着计算机、小型化仪器、传感器和智能手机的发展,可穿戴技术近年来获得了广泛的关注。可穿戴设备是可直接穿在身上或可整合到使用者的衣物或配件上的一种便携式设备,可通过软件支持、云端交互、数据交互来实现其强大的功能,对人类生活和感知将带来巨大的改变。由于谷歌眼镜的亮相,2012 年被称作“智能可穿戴设备元年”。可穿戴汗液分析

装置在体育运动领域也获得了应用,主要是将各种离子选择电极传感器和生物传感器集成在可穿戴的膜片上,通过蓝牙和手机连接完成设备的控制和数据采集分析。

美国加州大学伯克利分校的 Gao 等研制了基于汗液实时检测的可穿戴式电子设备,被称为“人体大数据收集器”,是一种多任务汗液感测系统<sup>[39]</sup>。其中各种传感器作为设备与皮肤间的接口,通过感知汗液成分了解人体健康状况,而柔性电路板上的硅芯片则负责复杂的信号处理。图 2 为 Gao 等研发的可穿戴式汗液分析电子设备实物照片。

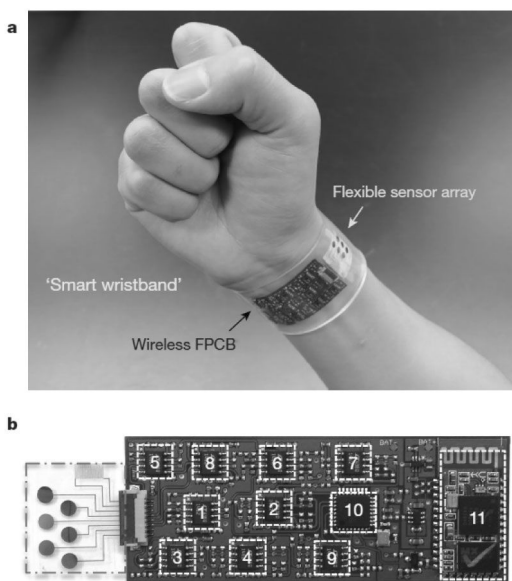


图 2 可穿戴式汗液分析电子设备实物照片

Figure 2 Photograph of A Wearable Electronic Equipment for Sweat Analysis

Xu 等研制了一种基于石墨烯-纤维素膜的可穿戴传感器,可用于人体汗液离子的检测,成功用于汗液中氯化钠的测定<sup>[40]</sup>。Schazmann 等将钠离子选择电极与可穿戴的设备组合成可用于运动中实时检测汗液中钠离子的设备,结果令人满意<sup>[41]</sup>。Liu 等研制了基于汗腺驱动的硅橡胶汗液收集装置,与电化学阻抗传感器联用,研制成功用于汗液离子化合物检测的可穿戴设备<sup>[42]</sup>,在运动员运动中的汗液检测有良好的应用前景。近日,浙江大学刘清君课题组联合中科院苏州纳米所等研发单位基于印刷电子技术,采用近场通讯技术和电化学传感技术,构建了一种无线、无源、柔性的贴皮式电化学传感贴片,可以实现运动员汗液中葡萄糖、钠离子、钾离子和 pH 等多种组分的定量分析,可为体育运动中有关指标的现场实时检测提供新方法<sup>[43]</sup>。

Bandodkar 等研制了一种无电池可穿戴式微流

控汗液分析装置,内部有吸收汗液样品的流路和检测腔体,具有电位、安培、比色检测功能,可用于出汗率以及汗液中乳酸、葡萄糖、氯离子和酸度的检测,检测结果可通过蓝牙于智能手机上读取和存储<sup>[44]</sup>。

### 3 小结和展望

通过对人体无损伤的非侵入式汗液分析,可了解运动时运动员身体状况、机体代谢情况以及运动时机体的适应性,在运动员选材、日常体育训练和体能恢复等方面具有十分重要的实际意义。各种基于分光光度法、原子发射光谱、火焰发射光谱、质谱、液相色谱、毛细管电泳、气相色谱、电位法等实验室常规技术已经日趋成熟,但设备体积庞大,不适合运动现场对运动员的检测。近年来,用于运动员汗液实时现场分析的穿戴式和便携式分析技术获得了广泛重视,国外有关研究较多,国内处于刚起步阶段。但可以预见,可穿戴体育运动生化指标检测系统在竞技体育和全民健身体育运动中具有广阔的应用前景,属于体育运动行业的新兴技术和朝阳产业。

### 参考文献:

- [1] 崔晓,程飏,刘坚.汗液代谢在机体活动中的生物学角色[J].感染、炎症、修复,2013,14(3):180-183.
- [2] 雷志平.足球大运动量训练中汗液尿素氮含量的分析[J].西安体育学院学报,1992,(4):48-51.
- [3] 苏州公安局.人体汗液成份的分析研究[J].刑事技术,1978,(5):24-30.
- [4] 杨则宜,陈吉棣,焦颖,等.夏季训练中运动员排汗及汗液成分的研究[J].体育科学,1984,(3):61-66.
- [5] 陈柏华,张思仲,杨元.定量毛果芸香碱电渗汗液收集和检查方法的建立[J].中华医学遗传学杂志,1995,12(4):229-232.
- [6] 江西赣州地区人体汗液研究小组.人体汗液主要成份的初步分析[J].刑事技术,1977,(4):4-13.
- [7] 吴潇男,林建棣,曲平,等.湿热环境下运动对汗液中尿素、乳酸和电解质的影响[J].武警医学,2012,23(1):8-10.
- [8] V. A. T. Dam, M. A. G. Zevenbergen, R. van Schaijk. Toward wearable patch for sweat analysis[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2016, 236: 834-838.
- [9] 阮芳铭,王恩美.离子选择电极-格氏作图法测定全身汗液钾、钠和氯[J].化学传感器,1990,(3):36-41.
- [10] 顾星,谭秦湘.自汗患者汗液中的钠、氯、钙、钾无机离子测定[J].中国中医基础医学杂志,2005,11(5):371-372.
- [11] H. Y. Y. Nyein, L. C. Tai, Q. Ph. Ngo, et al. A wearable microfluidic sensing patch for dynamic sweat secre-



- tion[J]. ACS Sensors, 2018, 3, 944-952.
- [12] S. Anastasova, B. Crewther, P. Bembnowicz, et al. A wearable multisensing patch for continuous sweat monitoring[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2016, 93: 139-145.
- [13] S. Biagi, S. Ghimenti, M. Onor, et al. Simultaneous determination of lactate and pyruvate in human sweat using reversed-phase high-performance liquid chromatography: a noninvasive approach[J]. Biomedical Chromatography, 2012, 26(11): 1408-1415.
- [14] Y. Kondoh, M. Kawase, S. Ohmori. D-Lactate concentrations in blood, urine and sweat before and after exercise[J]. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 1992, 65(1): 88-93.
- [15] S. Emaminejad, W. Gao, E. Wu, et al. Autonomous sweat extraction and analysis applied to cystic fibrosis and glucose monitoring using a fully integrated wearable platform[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(18): 4625-4630.
- [16] R. D. Munje, S. Muthukumar, S. Prasad. Lancet-free and label-free diagnostics of glucose in sweat using zinc oxide based flexible bioelectronics[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2017, 238: 482-490.
- [17] H. Lee, C. Song, Y. S. Hong, M. S. Kim, et al. Wearable/disposable sweat-based glucose monitoring device with multistage transdermal drug delivery module[J]. Science Advances, 2017, 3(3): Article Number: e1601314.
- [18] C. T. Huang, M. L. Chen, L. L. Huang, et al. Uric acid and urea in human sweat[J]. Chinese Journal of Physiology, 2002, 45(3): 109-115.
- [19] Y. Yokoyama, M. Aragaki, H. Sato, et al. Determination of sweat constituents by liquid ionization mass spectrometry[J]. Analytica Chimica Acta, 1991, 246(2): 405-411.
- [20] Y. J. Yu, I. Prassas, C. M. J. Muyljens, et al. Proteomic and peptidomic analysis of human sweat with emphasis on proteolysis[J]. Journal of Proteomics, 2017, 155: 40-48.
- [21] T. Marshall. Analysis of human sweat proteins by two-dimensional electrophoresis and ultrasensitive silver staining[J]. Analytical Biochemistry, 1984, 139(2): 506-509.
- [22] S. R. Corrie, J. W. Coffey, J. Islam, et al. Blood, sweat, and tears: developing clinically relevant protein biosensors for integrated body fluid analysis[J]. Analyst, 2015, 140(13): 4350-4364.
- [23] T. Hirokawa, H. Okamoto, Y. Gosyo, et al. Simultaneous monitoring of inorganic cations, amines and amino acids in human sweat by capillary electrophoresis[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 581: 83-88.
- [24] 邱仞之, 伍超英, 胡德泉, 等. 高湿热环境习服锻炼对全身汗液中营养成分含量的影响[J]. 航天医学与医学工程, 1992(3): 193-199.
- [25] 陆鼎一, 程有庆. 人体汗液中氨基酸的测定[J]. 化学通报, 1980(6): 19-20.
- [26] M. Calderon-Santiago, F. Priego-Capote, B. Jurado-Gamez, et al. Optimization study for metabolomics analysis of human sweat by liquid chromatography-tandem mass spectrometry in high resolution mode[J]. Journal of Chromatography A, 2014, 1333: 70-78.
- [27] 徐学笛. 相色谱法测定酒后人体汗液中乙醇含量的方法及研究[J]. 化工时刊, 2008, 22(3): 41-43.
- [28] A. P. Selvam, S. Muthukumar, V. Kamakoti, et al. wearable biochemical sensor for monitoring alcohol consumption lifestyle through Ethyl glucuronide (EtG) detection in human sweat[J]. Scientific Reports, 2016, 6: Article Number: 23111.
- [29] S. Sugase, T. Tsuda. Determination of lactic acid, uric acid, xanthine and tyrosine in human sweat by HPLC, and the concentration variation of lactic acid in it after the intake of wine [J]. Bunseki Kagaku, 2002, 51(6): 429-435.
- [30] 张工, 王一, 王晓辉, 等. 同步荧光法对人体汗液中微量维生素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 的同时测定[J]. 工业卫生与职业病, 1988, (6): 364-367.
- [31] 王斌, 柳映青, 蒋小良, 等. ICP-MS 法测定酸性汗液可萃取铅、镉、铜和汞[J]. 印染, 2004(11): 41-43.
- [32] 江荣, 杨平. 高湿热环境锻炼对汗液中微量元素的影响[J]. 化学工程与装备, 2017, 46(6): 42-43, 28.
- [33] T. Tsuda, S. Noda; S. Kitagawa, et al. Proposal of sampling process for collecting human sweat and determination of caffeine concentration in it by using GC/MS[J]. Biomedical Chromatography, 2000, 24(8): 505-510.
- [34] 张婷, 陈学国, 杨瑞琴, 等. 液相色谱-质谱法测定指纹汗液中咖啡因及其代谢物[J]. 理化检验-化学分册, 2015, 51(6): 795-799.
- [35] 聂军, 孟凡和, 于光烈, 等. 应用免疫电泳检测汗液中乙型肝炎病毒颗粒[J]. 第一军医大学学报, 1992, (4): 359-360.
- [36] 聂军, 于光烈, 戴子森, 等. 慢性无症状 HBsAg 携带者汗液中 HBV 的检测[J]. 第一军医大学学报, 1992, (1): 40-42.
- [37] 代喜斌, 李海燕. 液相微萃取-毛细管电泳联用对汗液基质中 4 种芳香胺的同时测定[J]. 分析测试学报, 2010, (10): 1025-1029.
- [38] 张文骥, 陈卓, 张婷, 等. 汗液中美托洛尔及其代谢物的

(下转第 94 页)



- of Strength and Conditioning Research, 2013, 27(8): 2198-2205.
- [58] Lovell T. W. J., Sirotic A. C., Impellizzeri F. M., et al. Factors Affecting Perception of Effort (Session Rating of Perceived Exertion) during Rugby League Training[J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2013, 8(1):62-69.
- [59] Brink M. S., Frencken W. G. P., Jordet G., et al. Coaches' and Players' Perceptions of Training Dose: Not a Perfect Match[J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2014, 9(3):497-502.
- [60] Monoem H., Georgios S., Leo D., et al. Session-RPE Method for Training Load Monitoring: Validity, Ecological Usefulness, and Influencing Factors[J]. Frontiers in Neuroscience, 2017, 11(11):612-625.
- [61] Gabbett T. J., Jenkins D. G. Relationship between training load and injury in professional rugby league players[J]. Journal of Science & Medicine in Sport, 2011, 14(3):204-209.
- [62] Rogalski B., Dawson B., Heasman J., et al. Training and game loads and injury risk in elite Australian footballers[J]. Journal of Science & Medicine in Sport, 2013, 16(6):499-503.
- [63] Cross M. J., Williams S., Trewartha G., et al. The Influence of In-Season Training Loads on Injury Risk in Professional Rugby Union[J]. International Journal of Sports Physiology & Performance, 2015, 11(3):350.
- [64] Nimmerichter A., Eston R. G., Bachl N., et al. Longitudinal monitoring of power output and heart rate profiles in elite cyclists[J]. Journal of Sports Sciences, 2011, 29(8):831-839.
- [65] Veugelers K. R., Young W. B., Fahrner B., et al. Different methods of training load quantification and their relationship to injury and illness in elite Australian football[J]. Journal of Science and Medicine in Sport, 2015, 19:24-28.
- [66] Blanch P., Gabbett T. J. Has the athlete trained enough to return to play safely? The acute:chronic workload ratio permits clinicians to quantify a player's risk of subsequent injury[J]. British Journal of Sports Medicine, 2015(50): 471-475.
- [67] Hulin B. T., Gabbett T., Lawson D. W., et al. The acute:chronic workload ratio predicts injury: high chronic workload may decrease injury risk in elite rugby league players[J]. Br. J. Sports Med., 2016, 50(4):231-236.
- [68] Gabbett T. J. The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder?[J]. Br. J. Sports Med., 2016, 50(5):273-280.
- [69] Stewart A. M., Hopkins W. G. Swimmers' compliance with training prescription.[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1997, 29(10):1389-92.
- [70] Viveiros L., Costa E., Moreira A., et al. Training load monitoring in judo: comparison between the training load intensity planned by the coach and the intensity experienced by the athlete[J]. Rev. Bras. Med., Esporte, 2011, 17:266-269.
- [71] Morgan W. P. Psychological factors influencing perceived exertion[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1973, 5(2):97-103.
- [72] Morgan W. P. Psychological components of effort sense[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1994, 26(9): 1071-1077.

(责任编辑:刘畅)

(上接第 84 页)

- 提取与检测[J].中国司法鉴定,2016,(6):28-32.
- [39] W. Gao, S. Emaminejad, H. Y. Nyein, et al. Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis[J]. Nature, 2016, 529(7587): 509-514.
- [40] H. Xu, Y. F. Lu, J. X. Xiang, et al. A multifunctional wearable sensor based on a graphene/inverse opal cellulose film for simultaneous, in situ monitoring of human motion and sweat[J]. Nanoscale, 2018, 10(4): 2090-2098.
- [41] B. Schazmann, D. Morris, C. Slater, et al. A wearable electrochemical sensor for the real-time measurement of sweat sodium concentration[J]. analytical Methods, 2010, 2(4): 342-348.
- [42] G. Liu, C. Hob, N. Slappey, et al. A wearable conductivity sensor for wireless real-time sweat monitoring[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2016, 227: 35-42.
- [43] G. Xu, C. Cheng, Z. Y. Liu, et al. Battery-free and wireless epidermal electrochemical system with all-printed stretchable electrode array for multiplexed in situ sweat analysis[J]. Advanced Materials Technologies, 2019.
- [44] A. J. Bandodkar, P. Gutruf, J. Choi, et al. Battery-free, skin-interfaced microfluidic/electronic systems for simultaneous electrochemical, colorimetric, and volumetric analysis of sweat[J]. Science Advances, 2019, 5: 3294.

(责任编辑:刘畅)