残疾人男子轮椅竞速 T54 级项目能量消耗特征

黄 鹏[1],章凌凌[2],吴雪萍[3]

摘 要:目的:能量消耗是周期性速度项目运动成绩的决定因素,也是教练员制定年训练量和营养方案的主要依据。旨在探究男子轮椅竞速 T54 级运动员不同速度下单位距离能量消耗(Cw)的特征,为推进我国轮椅竞速的科学化训练和制定合理的膳食标准提供依据和参考。方法:招募 10 名高水平轮椅竞速 T54 级运动员,年龄(22.90±5.17)岁,体重(59.27±8.31)kg,在室外田径场分别进行 1 次 1 500 m 全力运动和逐级递增负荷测试。使用便携式气体代谢仪、Polar 心率带、GPSports 运动表现追踪系统对受试者每次呼吸的摄氧量(VO_2)、心率(HR)、速度和距离变化进行监控。通过全力运动和每级递增负荷测试的总能耗与速度的比值计算出轮椅竞速不同速度下单位距离的 Cw。结果:受试者全力运动下的速度为(7.20±0.28)m/s,Cw 为 0.13 kJ/m;递增负荷测试的Cw 从0.09 kJ/m、速度(5.38±0.25)m/s,逐渐增加到(0.12±0.02)kJ/m、速度(6.45±0.29)m/s,获得 Cw 与速度、VO_2 与速度的指数回归方程,分别为 $Cw=0.059x^{1.6175}$ 和 $VO_2=379.2x^{1.8705}$。结论:残疾人轮椅竞速项目 Cw 和 VO_2 随着速度的增加成指数增长趋势;轮椅竞速 Cw 在健全人跑步和自行车项目之间,与速度滑冰项目较为接近。

关键词:残疾人运动员;轮椅竞速;单位距离;能量消耗;残奥会
中图分类号:G804.1 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2023)05-0090-08
DOI:10.12064/ssr.2023051701

Energy Cost Characteristics of T54 Men's Wheelchair Race

HUANG Peng[1], ZHANG Lingling[2], WU Xueping[3]
(1. Shanghai Culture and Sport Promotion Center for Person with Disabilities & Shanghai Special Olympics Game Training Center, Shanghai 200083, China; 2. Physical Education Department, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China; 3. Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Objective: The energy cost plays a decisive role in improving athletic performance for cyclic sport activities. It is also the main rules for coaches to set out annual training volume and nutrition program, but there is little research on wheelchair racing. The aim of this study is to investigate the energy cost per unit of distance (Cw) of wheelchair racing. Methods: Ten T54 high-level men's wheelchair racers (22.90±5.17 yrs, 59.27±8.31 kg) participated in the research. They each had a 1 500 m all-out running test and an incremental exercise test on the outdoor track and field. A portable gas analyzer was used to measure VO_2 at every breath, and GPSports and Polar was used to monitor V and HR changes. C_w per unit distance of wheelchair racing at different speeds was calculated by the ratio of total energy consumption to the speed. Result: At 1500 m test, the speed is 7.20±0.28 m/s, C_w is 0.13 KJ/m; at incremental test, the C_w is from 0.09 KJ/m(speed is 5.38±0.25 m/s)gradually increased to 0.12±0.02 KJ/m(speed is 6.45±0.29 m/s). The regression equation of Cw speed and VO_2-speed is obtained, $C_w=0.059x^{1.6175}$ and $VO_2=379.2x^{1.8705}$, respectively. Conclusion: the Cw and VO_2 of wheelchair racing in this study increased with the increase of speed as demonstrated by a function with an exponent of 1.6175 and 1.8705. the C_w wheelchair race is in between able-bodied running and cycling, close to speed skating.

Keywords: disabled athletes; wheelchair racing; per unit of distance; energy cost; the Paralympics

第二次世界大战之后，为了促进在战争中受伤的退伍军人康复，轮椅竞速项目应运而生并逐渐开展起来,1964 年轮椅竞速被正式列入残奥会项目。2021 年联合国发布的报告显示,残障人士占我们世界总人口 15 %,达到 12 亿人。轮椅残疾人群体由于生理上和功能上的限制,更倾向于久坐的生活方式,

收稿日期:2023-05-17
基金项目:上海市海外高层次人才项目(TP2020063)。
第一作者简介:黄鹏,男,学士,中级教练。主要研究方向:运动训练。E-mail:467315629@qq.com。
作者单位:1.上海市残疾人文化体育促进中心(上海特奥竞赛训练中心),上海 200083;2.上海财经大学 体育教学部,上海 200433;3.上海体育大学,上海 200438。

导致患心血管疾病、肥胖和血脂异常的风险加大[1]。研究发现，通过系统的轮椅竞速训练能够有效的提高他们的新陈代谢、心血管能力、肌肉可募集数量[2-4]。

能量消耗（Energy Cost）的概念由意大利的 Di Prampero[5]在 1986 年首次提出，指前进单位距离所消耗的高于安静水平的额外能量，单位为 J/m、kJ/km。能量消耗可以反映人类不同运动方式或同一运动方式不同运动水平的运动效率[5]，也可用于更为准确地计算周期类体力活动的能量消耗[6]。而运动员个体能量消耗的差异对运动成绩的影响高达 45%~55%[7]，因此能量消耗对比赛成绩具有重要的决定作用[5-9]。此外，对不同运动方式下能量消耗的了解是教练员安排年训练量和训练计划(量和强度)[9-10]、制定营养方案、避免过度疲劳的主要依据[10-12]。

目前，有关能量消耗的研究涵盖了陆上和水上 / 中的多种周期类运动项目，并且逐步在非周期性运动项目中开展研究[13]，主要包括对健全人自由泳[14]、皮划艇[15-16]、赛艇[17]、跑步[5]、自行车[5]、滑冰[5,18]和乒乓球[13]项目能量消耗的研究，发现不同运动方式的能量消耗存在较大差异。在已发表的《身体活动概要》中总结了人类 826 种不同运动方式和身体活动的能量消耗，但是目前还未见对残疾人轮椅竞速项目能量消耗的研究。鉴于此，本研究探究了残疾人轮椅竞速 T54 级运动员在不同速度下单位距离的能量消耗（Cw）特征，旨在推动我国轮椅竞速项目的科学化训练和促进运动员水平的提高，进一步丰富和拓展人类不同运动方式能量消耗的研究。

1 研究方法

1.1 研究对象

招募 10 名男子 T54 级轮椅竞速运动员自愿参加本研究(表 1)。受试者中，8 人具有国际比赛经历，2 人具有全国比赛经历，平均训练年限在(5.30±2.58)年。测试前已告知受试者详细的测量流程、存在的风险并签署知情同意书。要求受试者在测试前 24 h 内避免进行大强度运动和力量训练，每次进食时间离测试时间需≥1.5 h，可以正常饮水但是不可饮用含咖啡因和酒精的饮料。所有运动员均使用自己的竞速轮椅参与测试。

表 1 受试者基本信息

Table1 Participant characteristics

序号	损伤	年龄 / 岁	坐高 /cm	体重 /kg	受伤年限 / 年	训练年限 / 年
1	截肢	18	90.15	61.07	3	3
2	截肢	21	90.47	56.27	3	5
3	脊髓损伤	26	98.21	76.31	26	8
4	脊髓损伤	28	90.03	66.22	28	8
5	截肢	23	94.37	61.03	19	6
6	脊髓损伤	19	90.32	65.71	19	3
7	脊髓损伤	18	86.11	50.61	17	3
8	脊髓损伤	23	89.07	53.18	23	3
9	脊髓灰质炎	34	92.22	54.04	30	10
10	脊髓损伤	19	90.15	50.35	6	4
$\bar{X}$±SD	-	22.90±5.17	90.90±3.21	59.27±8.31	17.40±10.15	5.30±2.58

1.2 测试流程

1.2.1 全力运动测试

已有文献中，对能量消耗的全力运动测试常采用 4 min[16]、1 000 m 和 2 000 m[15]的测试方案。本研究考虑到 T54 级不同水平运动员 1 500 m 的比赛时间在 3 分 36 秒 ~4 分 20 秒。以运动员熟悉的比赛距离(而非时间)进行测试，运动员更容易发挥出真实水平。因此，本研究选用 1 500 m 最快速度测试。

受试者首先进行 15 min 的热身活动（以身体微微出汗为准），然后静坐在轮椅上休息 5 min，其间工作人员为受试者装戴便携式气体代谢仪（K4b2，Cosmed，意大利）、心率带（Polar Accurex Plus，Ploar Electro Oy，芬兰）和卫星定位评估系统（GPSports HPU，Canberra，澳大利亚）。这些仪器装备于运动员身上不会带来动作幅度的改变或其他不适。测试开始后操作人员和教练员口头鼓励受试者全力运动。

对受试者测试全程和测试结束后 6 min 的呼吸、心率(Heart Rate, HR)、速度和距离变化进行全程监控；采集受试者准备活动前、后，全力运动测试后 1 min、3 min、5 min、7 min、10 min 耳血 10 μL 进行血乳酸分析（Biosen C_line，EKF Diagnostic，德

国);测试结束后对受试者进行主观疲劳度测试(RPE)[11]。

1.2.2 递增负荷测试

要求受试者完成4级递增负荷测试(图1),每组测试5 min,组间休息10 min,运动员分别以1 500 m最快速度测试的75%、80%、85%和90%的平均速度进行测试[16,19]。测试前将8个标志筒(间隔50 m)分别放置在室外400 m田径场,根据受试者个体每级递增速度制作音频。同时,竞速轮椅上自带的速度显示器为运动员提供实时速度信息。

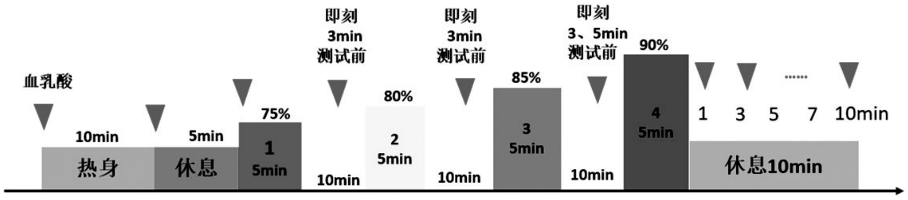

图1 4级递增负荷测试流程图

Figure1 The experiment procedure of 4 level incremental exercise test

测试过程中,受试者佩戴气体代谢仪、Polar心率带和GPSports运动表现追踪模块,并实时监控,研究人员跟随受试者播放音响并进行口头鼓励,要求受试者根据速度要求完成测试。在每级测试结束即刻、休息3 min、下一级开始前以及4级递增负荷结束后1 min、3 min、5 min、7 min、10 min采集耳血;每级测试结束后进行RPE测试[11]。所有受试者在测试中均完成全部4级递增测试,实际测试强度分别为(77.02±2.00)%、(81.50±1.56)%、(86.01±1.56)%、(91.08±1.22)%,每级测试平均距离为(1 653.80±74.54)m、(1 762.63±79.99)m、(1 855.58±98.06)m、(1 987.71±86.71)m。

1.3 能量消耗计算

根据Beneke等[20-21]提出的能量消耗计算方法,总能量消耗(W_{TOT},kJ)包括无氧无乳酸(W_{PCR},kJ),无氧乳酸(W_{BLC},kJ)和有氧供能(W_{AER},kJ)。其总的计算公式:

$W_{TOT}=W_{PCR}+W_{BLC}+W_{AER}$

W_{PCR}根据恢复期氧债的快速部分得出[22-24],以运动后3 min为分界点将运动后摄氧量(VO_2)分为两部分(快速部分和慢速部分),二部分之和为运动后实际VO_2[20-21]。无氧乳酸部分是根据净血乳酸值(BLC_{net}),氧气–乳酸换算系数为1 mmol乳酸对应的氧气量,假设乳酸在体内分布区域所对应的体重约为身体重量的45%,这个系数为3.0 mL/kg/mmol/L[25];W_{AER}部分根据测试中的累积摄氧量得出(高于安静水平)。本研究考虑到残疾运动员与健全人在生理上可能有一定差异,因此对每个受试者分别进行了3次清晨空腹静卧状态下5 min的气体代谢测试,取3次平均值作为受试者个体安静VO_2值用于计算个体能量供应比例,10位受试者平均安静VO_2为(4.65±0.40)mL/min/kg。3个部分的能量消耗相加即为最大强度测试和每一级次最大强度测试的总能量消耗。总距离(m)除以最快速度和递增负荷下的能量消耗即为单位距离下的能量消耗(J/m)。

1.4 数理统计

将从气体代谢仪和GPSports测试中获得实验数据录入SPSS19.0,采用单因素重复方差分析比较全力运动测试和4级递增负荷中各级之间的生理学指标和能量代谢指标。

2 研究结果

受试者1 500 m全力运动测试中的平均速度为(208.61±7.68)s,平均速度为(7.20±0.28)m/s。测试中最大心率(HR_{max})为(190.71±10.60)次/min,达到%HR_{max}的(88.05±4.71)%。受试者测试后BLC_{net}为(9.27±2.48)mmol(P<0.001),RPE为14.86±1.95(介于吃力到非常吃力之间)。运动员总能量供应量为(200.14±41.21)kJ,W_{PCR}、W_{BLC}和W_{AER}供应量分别为(28.26±6.52)kJ、(39.29±12.18)kJ和(132.60±27.52)kJ,有氧和无氧的供能比例分别为(66.27±1.93)%和(33.73±1.93)%(P<0.001)。

在4级递增负荷强度下,相邻递增负荷测试的距离、速度、累积VO_2、VO_{2peak}、RPE均具有显著性差异(P<0.05)。受试者速度从(5.38±0.25)m/s逐渐增加到(6.45±0.29)m/s,相邻测试强度下的速度均具有显著性差异(P<0.05)。BLC_{net}分别为(1.33±0.57)mmol、(1.49±0.99)mmol、(2.32±1.39)mmol、(4.45±1.80)mmol。运动后最高血乳酸值(BLC_{max})、BLC_{net}在第2与第3、第3与第4的差异具有显著性(P<0.05)。在心率指标上,范围在160.71~190.71次/min,除了第一级%HR_{max}在90%以下外,后3级测试的%HR_{max}均达到90%以上。HR_{max}在1 500 m全力测试中第2与第3、第3与

第 4 的差异具有显著性（$P<0.05$）；受试者 RPE 从第一级 6.71±1.11（根本不费力）逐渐增加到 10.00±2.08（轻松），相邻级数的 RPE 具有显著性差异（$P<0.05$）（表 2）。

表 2 轮椅竞速全力运动和递增负荷测试各项生理学指标（$\bar{X}$±SD）

Table2 Wheelchair racing all-out test and incremental exercise test physiological results（$\bar{X}$±SD）

测试内容	1st Step	2nd Step	3rd Step	4th Step	Maximal
	5 min	5 min	5 min	5 min	1 500 m
距离 /m	1 653.80±74.54	1 762.63±79.99**	1 855.58±98.06*	1 987.71±86.71**	1 500**
速度 /($m \cdot s^{-1}$)	5.38±0.25	5.73±0.27**	6.03±0.32*	6.45±0.29**	7.20±0.28**
HR_{max}/(次·min^{-1})	160.71±11.69	161.57±7.18	165.00±8.16*	175.71±9.14**	190.71±10.60*
HR_{ave}/(次·min^{-1})	143.29±8.56	149.63±6.94*	154.45±7.00*	162.80±6.32**	167.59±5.93
%HR_{max}/%	89.27±3.38	92.67±3.93	93.67±3.93	92.79±4.40	88.05±4.71*
累积 VO_2/mL	7 609.36±1 112.60	8 796.63±1 259.31**	9 553.92±1 401.29*	10 909.10±1 657.19*	7 334.43±1 378.80*
BLC_{max}/ mmol	2.68±0.89	2.84±1.04	3.67±1.45*	5.80±1.79**	11.46±2.91*
BLC_{net}/mmol	1.33±0.57	1.49±0.99	2.32±1.39*	4.45±1.80**	9.27±2.48**
VO_{2peak}/($mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$)	25.71±3.08	29.59±2.54*	33.29±4.48*	36.26±5.75*	38.03±7.02
VO_{2PCR}/mL	693.19±341.47	856.34±743.51	987.12±499.43	1447.42±507.18	1337.48±308.77
R.Q.	1.06±0.12	1.07±0.09	1.12±0.08	1.15±0.23*	1.54±0.19**
RPE	6.71±1.11	7.57±1.72*	8.57±1.72*	10.00±2.08*	14.86±1.95*
W_{PCR}/ kJ	13.12±7.22	18.10±15.71	20.86±10.55	30.59±10.72	28.26±6.52
W_{BLC}/ kJ	4.27±2.77	6.01±3.85	9.28±5.45*	18.01±8.22*	39.29±12.18**
W_{AER}/ kJ	132.00±20.42	151.87±23.26**	169.97±27.71*	194.43±35.43*	132.60±27.52*
W_{ANA}/ kJ	17.39±8.38	24.11±19.32	30.14±13.64	48.60±15.02*	67.55±14.41*
W_{TOT}/ kJ	149.93±20.00	175.98±33.99*	200.11±31.55*	248.03±35.78*	200.14±41.21*
W_{PCR}/%	8.75±5.13	9.37±7.46	10.45±5.04	12.47±4.57	14.27±2.64
W_{BLC}/%	2.85±1.58	3.18±1.82	4.42±2.25	7.33±3.07*	19.46±3.31**
W_{ANA}/%	11.60±5.85	12.55±9.09	14.88±6.06	19.81±5.79*	33.73±1.93**
W_{AER}/%	88.40±5.85	87.45±9.09	85.12±6.06	80.19±5.79*	66.27±1.93**
C_w/kJ/m	0.09±0.01	0.10±0.02	0.11±0.01	0.12±0.02*	0.13±0.03

注：* 表示差异具有显著性，$P<0.05$；** 表示差异具有极显著性，$P<0.001$；BLC_{net}= 运动后最高血乳酸值–测试前血乳酸值。R.Q.为呼吸商；VO_{2PCR} 为摄氧量快速部分。

在能量代谢指标方面各级之间的有氧和 W_{TOT} 均具有显著性差异（$P<0.05$）；W_{PCR} 供能随测试强度的增加而略有增加（$P>0.05$）；W_{BLC} 供能在第 2 与第 3、第 3 与第 4 的差异具有显著性（$P<0.05$）。在供能比例上，有氧供能百分比（W_{AER}%）随着测试强度的增加而减小，磷酸原（W_{PCR}%）和糖酵解（W_{BLC}%）供能比例逐渐增加，但是不具有显著性差异（$P>0.05$）。

在全力运动和递增负荷中男子轮椅竞速 T54 级运动员的能量消耗与速度的函数关系为 $Cw=0.059x^{1.6175}$，$R^2=0.6265$，VO_2 和速度的函数关系为 $Y=379.2x^{1.8705}$，$R^2=0.9048$（图 2）。

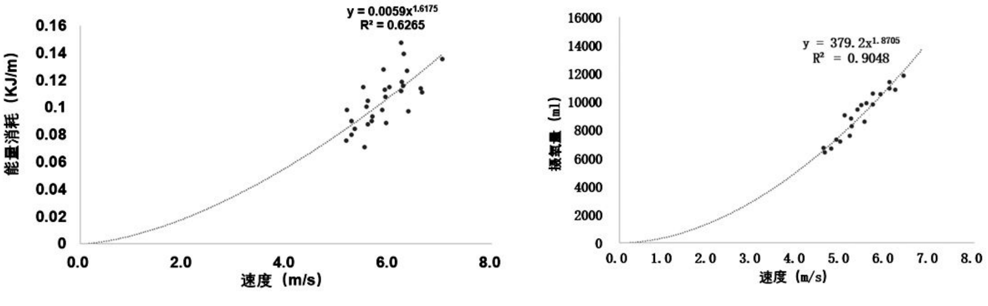

图 2 轮椅竞速能量消耗、VO_2 与速度的函数关系示意图

Figure2 Wheelchair racing energy cost、VO_2 as a function of speed at submaximal and maximal test

将本研究结果与健全人跑步[6]、自行车[6]、划艇[15]、游泳[26]、滑冰[6]项目在不同速度下能量消耗的比较发现(图3),游泳、划艇的运动速度最低且能量消耗最高,自行车、滑冰的动作速度最快且能量消耗最低,而跑步项目的速度和能量消耗居中。轮椅竞速项目的能量消耗在跑步和自行车项目之间,其能量消耗与速度滑冰项目较为接近。

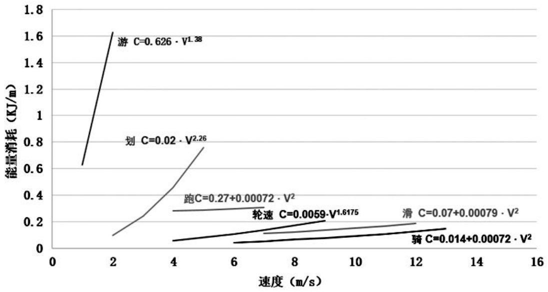

图3 轮椅竞速与跑、骑、滑、游不同运动方式的能量消耗对比

Figur e3 The energy cost of swimming, running, bicycling, skating and wheelchair racing as a function of the Speed

3 分析与讨论

本研究旨在对男子T54级轮椅竞速运动员不同速度下单位距离的能量消耗进行分析。结果发现,轮椅竞速Cw随着速度的增加呈现指数增长,通过指数为1.617 5的函数所证明,用方程式$Cw=0.059x^{1.617\,5}$,$R^2=0.626\,5$表示。只需将速度(m/s)代入该回归方程,即可得到男子T54级轮椅竞速项目的单位距离的能量消耗。此外,结果发现在递增负荷下VO_2随着速度的增加成指数增长趋势,可通过指数为1.870 5的函数关系式证明,方程式为$Y=379.2x^{1.870\,5}$,$R^2=0.904\,8$。

周期性运动中,移动中的能量消耗是由单位距离的W_{TOT}(kJ/m)和运动效率组成(ηL)[7],即$C=Wtot/\eta L$。当W_{TOT}越大,ηL越小时,C越大。运动效率受推进效率和肌肉效率的影响,其中肌肉效率取决于肌纤维类型的组成、收缩的长度和速度,以及收缩类型(向心和离心)。W_{TOT}包括克服外部阻力因素和克服非外部阻力因素[27-30]。其中,克服外部阻力因素指产生向前推进的力量,克服非外部阻力因素指对推力没有贡献的力量。在陆上项目中外部阻力通常指空气阻力,取决于速度(V)、空气阻力系数(Cd)、空气密度(p)、车与人的身体前表面积(A)[5-6]。在跑和走的项目中外部阻力可以忽略不计[30],但是对自行车[28,31]、轮椅竞速[32]项目来说则非常重要。因此,运动中肌肉的能量以力量的形式表现出来,在比较不同周期性运动项目之间能量消耗差异时,需要分析参与能量传导的肌肉因素、不参与能量传导的肌肉因素、专项技术动作的能量传导效率、项目装备附加的能量传导效率、人体所处外部环境及速度等影响因素。

轮椅竞速的能量消耗增加趋势与健全人自行车、皮划艇项目相似,均随着速度的增加呈现指数增长趋势;而单位距离下,陆上跑速和能量消耗的关系呈现递减趋势[33]。跑步项目的能量消耗几乎独立于速度,随着跑速的增加,单位距离的能量消耗逐渐降低,跑速越快,效率越高。Capelli等[27]对高水平年轻游泳运动员在给定速度下4种泳姿的能量消耗进行比较发现自由泳和仰泳的能量消耗随着速度的增加成指数增长趋势。此外,从图3可见水上项目的能量消耗要明显高于陆上项目,这是因为水中阻力要远远大于空气阻力[9]。但是,同样是需要克服水中阻力,游泳有超过50%的输出功率被浪费而没有产生实际的推进力(推进经济性为0.35~0.40)[34-35],而皮艇/赛艇项目通过船桨获得了附加的能量传导效率(推进经济性为0.65~0.75)[29],因而比游泳拥有更高的位移速度和相同速度下更低的能量消耗。

进一步比较发现,速度滑冰、自行车、轮椅竞速项目比跑步拥有更高的速度和更低的能量,原因有三:一是鞋底冰刀和轮胎可以减少滑冰和自行车、轮椅竞速项目前进中摩擦部分的阻力并允许滑行;二是由于运动工具的存在使速度滑冰、自行车、轮椅竞速项目的专项运动方式减低了不参与能量传导的肌肉比例,从而减少整体能量消耗水平;三是自行车拥有齿轮传动系统,获得了比速度滑冰、轮椅竞速更高的能量传导效率。因此,跑步、走路项目用于对抗非空气动力学的能耗≥90%以上,自行车、轮椅竞速项目≤10%,自行车是走路经济性的约2.5倍,速度滑冰项目则介于两者之间[36]。

虽然轮椅竞速的能量消耗水平接近于速度滑冰,但与跑步、自行车、滑冰项目相比、轮椅竞速的速度与能量消耗特征仍存在显著差异,这与竞速轮椅专项特征和残疾人的特异性有关。一方面,跑步时全身大部分肌肉参与运动,而自行车、滑冰的运动方式是以下肢运动为主的。轮椅竞速是以上肢发力为主的运动,手臂运动的生理反应和机械效率较低[2]。同时,人体骨骼肌肉的一半分布在下肢,轮椅竞速运动员存在下肢缺陷和肌肉萎缩,运动中参与产生向前推进力量的肌肉总量要低于以下肢发力为主的速度滑冰、自行车和跑步项目。因此,轮椅运动员较难达到与健全人相同水平的能量消耗[37];另一方面,人体上肢中的快肌纤维数量要远高于下肢[38];而在脊髓

损伤导致肢体瘫痪的运用中快缩、糖酵解型肌纤维占比更大,同时会伴有慢缩、氧化型肌纤维的减少。这一肌纤维类型的改变是由瘫痪肌肉的神经刺激下降或者肌肉量的减少造成的，可能会造成有氧能力的下降。

对于周期性陆上和水上体能类项目的训练而言,准确了解运动项目的能量消耗水平有助于教练员在制定年度训练计划时科学地控制年总训练距离[39]。人体一天最大供能量为 5 800 kcal。轮椅竞速 T54 级运动员安静状态下的能量消耗为(1 521.60±294.00)kcal[40],两者差值可用于运动员每天训练的能量消耗。因此,T54 级轮椅竞速运动员每日可用于运动消耗的最大能量约为 3 500~4 000 kcal,与健全人类似。对于大多数长距离耐力性项目而言,全年训练量的 70%~90%都在低于 4 mmol 乳酸阈的强度下完成[41]。以公路自行车为例,单位距离的能量消耗在 4 mmol 乳酸阈值时为 0.10 kJ/m[40],假设运动员每日可用于运动消耗的最大能量为 3 500 kcal,每年训练 360 d,则可以计算出公路自行车项目年训练公里数理论最大值为 52 920 km。根据现有统计,自行车年训练距离约在 30 000~35 000 km[42],为理论最大值的 56.7%~66.1% 在游泳项目中，乳酸阈强度下对应的能量消耗在 0.95 kJ/m[40],计算得出其年训练距离理论最大值为 5 570.5 km，游泳的实际年训练量在 3 000~3 500 km，为理论最大值的 53.9%~62.8%。同理,跑步、赛艇和皮划艇项目在乳酸阈强度下对应的能量消耗在 0.4 kJ/m 左右，计算得出其年训练距离理论最大值为 13 230 km，这些项目年训练量约为 6 000 km,为理论最大值的 45.4%。综上可知,在训练实践中,周期性耐力项目的实际训练距离通常控制在理论最大值的 45.4%~66.1%之间。轮椅竞速项目的乳酸阈在 5.5 mM 时的能量消耗约为 0.126 kJ/m,其年训练距离理论最大值为 41 860 km,参照其他周期性耐力项目年训练距离控制水平，轮椅竞速全年训练距离的建议控制在 19 004.44~22 7669.46 km，超过这一训练量可能造成过度疲劳和伤病的出现。

本研究不足之处在于受试者样本量较小，但鉴于我国残疾人轮椅竞速运动员数量相对有限，所招募的受试对象均为我国高水平轮速运动员，因此研究结果可以代表轮椅竞速 T54 级项目的能量消耗特征。此外,本研究获得 Cw 与速度的回归方程其 R 值偏低,为 0.626 5,略低于其他研究,考虑到本研究虽然是在室外 400 m 标准比赛场地进行测试，测试结果受气候、仪器、场地条件的影响较大,但相比在实验室能够获得运动员更为真实的生理学反应[44],本研究结果仍具有一定的参考价值。

4 结论

男子 T54 级高水平轮椅竞速运动员的能量消耗和 VO_2 均随着速度的增加而增加，呈指数增长趋势。轮椅竞速不同速度下单位距离的能量消耗和 VO_2 的回归方程分别为 $Cw=0.059x^{1.617\,5}$,$R^2=0.626\,5$ 和 $VO_2=379.2x^{1.870\,5}$,$R^2=0.904\,8$。

本研究在对健全人和残疾人不同体力活动和运动方式能量消耗认识的基础上，进一步拓展和丰富了对轮椅竞速项目这一运动方式能量消耗的研究。其研究结果能为我国轮椅竞速运动员和轮椅残疾人康复群体在制定训练计划、年训练量和安排营养饮食方案方面提供参考依据，有助于促进我国轮椅竞速项目科学化训练水平的提高。

参考文献：

[1] ASAYAMA K, NAKAMURA Y, OGATA H, et al. Energy expenditure of paraplegic marathon runners measured during a wheelchair marathon[J]. Journal of UOEH, 1984, 6(2):121-130.

[2] ASAYAMA K, NAKAMURA Y, OGATA H, et al. Physical fitness of paraplegics in full wheelchair marathon racing[J]. Paraplegia, 1985, 23(5):277-287.

[3] OKUMA H, OGATA H, HATADA K. Transition of physical fitness in wheelchair marathon competitors over several years[J]. Paraplegia, 1989, 27(3):237-243.

[4] ABEL T, KRONER M, ROJAS V S, et al. Energy expenditure in wheelchair racing and handbiking - a basis for prevention of cardiovascular diseases in those with disabilities[J]. European Journal of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation, 2003, 10(5):371-376.

[5] DI PRAMPERO P E. The energy cost of human locomotion on land and in water[J]. International Journal of Sports Medicine, 1986, 7(2):55-72.

[6] ZAMPARO P, CAPELLI C, POGLIAGHI S. Bioenergetics of cyclic sports activities on land: Walking, running and cycling[J]. Nutr Enhanced Sports Performance, 2013,133-142.

[7] CAPELLI C. Physiological determinants of best performances in human locomotion[J]. European Journal of Applied Physiology, 1999, 80(4):298-307.

[8] ZAMPARO P, BONIFAZI M. Bioenergetics of cyclic sport activities in water: Swimming, rowing and kayaking[J]. Nutrition and Enhanced Sports Performance, 2013, 143-150.

[9] PUGLIESE L, PORCELLI S, VEZZOLI A, et al. Different training modalities improve energy cost and performance in master runners[J]. Front Physiol, 2018, 9(1): 21-30.
[10] 黎涌明.不同运动方式的能量代谢:共性与区别[J].体育科学,2013,33(12):81-86.
[11] ZAMPARO P, BONIFAZI M, FAINA M, et al. Energy cost of swimming of elite long-distance swim mers [J]. European Journal of Applied Physiology, 2005, 94(5-6): 697-704.
[12] ZAMPARO P, PERINI R, ORIZIO C, et al. The energy cost of walking or running on sand[J]. European Journal of Applied Physiology, 1992, 65(2):183.
[13] 黎涌明,李博,王欣欣,等.能量消耗 C 指标在评价乒乓球运动员多球练习中能量消耗的应用[J].中国应用生理学杂志,2019,35(4):331-335.
[14] CAPELLI C, PENDERGAST D R, TERMIN B. Energetics of swimming at maximal speeds in humans [J]. European Journal of Applied Physiology, 1998, 78 (5): 385-393.
[15] ZAMPARO P, CAPELLI C, GUERRINI G. Energetics of kayaking at submaximal and maximal speeds[J]. European Journal of Applied Physiology, 1999, 80(6):542-548.
[16] lI Y M. Energetics in canoe sprint[D]Germany: Universität Leipzig,2015:52-60.
[17] DI PRAMPERO PE, CORTILI G, CELENTANO F, et al. Physiological aspects of rowing[J]. Journal of Applied Physiology, 1971, 31(6): 853-857.
[18] MILLET G P, BOISSIERE D, CANDAU R. Energy cost of different skating techniques in cross-country skiing[J]. Journal of Sports Sciences, 2003, 21(1):3-11.
[19] BUGLINONE A, LAZZER S, COLLI R, et al. Energetics of best performances in elite kayakers and canoeists [J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2011, 43(5): 877-884.
[20] BENEKE R, POLLMANN C, BLEIF I, et al. How anaerobic is the wingate anarobic test for humans? [J]. European Journal of Applied Physiology, 2002, 87(4-5): 388-392.
[21] BENEKE R, BERYER T, JACHNER C, et al. Energetics of karate kumite [J]. European Journal of Applied Physiology, 2004, 92(4):518-523.
[22] MARGARIA R, EDWARDS H T, DILL D B. The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction [J]. American Journal of Physiology, 1933, 106(3):689-715.
[23] KNUTTGEN H G. Oxygen debt after submaximal physical exercise [J]. Journal of Applied Physiology, 1970, 29(5):651-657.
[24] ROBERTS A D, MORTON A R. Total and alactic oxygen debts after supramaximal work[J]. European Journal of Applied Physiology, 1978, 38(4):281-289.
[25] DI PRAMPERO P E. Energetics of muscular exercise [J]. Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology, 1981, 89:143-222.
[26] ZAMPARO P, CAPELLI C, CENCIGH P. Energy cost and mechanical efficiency of riding a four-wheeled, hu man-powered, recumbent vehicle[J]. Eur J Appl Physiol, 2000, 83(6):499-505.
[27] CAPELLI C, ROSA G, BUTTI F, et al. Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles[J]. European Journal of Applied Physiology, 1993, 67(2):144-149.
[28] DI PRAMPERO P E, CORTILI G, MOGNONI P, et al. Equation of motion of a cyclist[J]. Journal of Applied Physiology, 1979, 47(47):201-206.
[29] CAPELLI C, SCHENA F, ZAMPARO P, et al. Energetics of best performances in track cycling[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 1998, 30(4):614-624.
[30] LAFERRIER J Z, RICE I, PEARLMAN J, et al. Technology to improve sports performance in wheelchair sports[J]. Sports Tech, 2012, 5(1): 1-16.
[31] 王欢.步行能量消耗特征的研究与应用[D].上海:上海体育学院,2013,49-51.
[32] ZAMPARO P, PENDERGAST D R, MOLLENDORF J, et al. An energy balance of front crawl[J]. European Journal of Applied Physiology, 2005, 94(1-2):134-144.
[33] FIGUEIREDO P, ZAMPARO P, SOUSA A, et al. An energy balance of the 200 m front crawl race[J]. European Journal of Applied Physiology, 2011, 111(5):767-777.
[34] ZUNTZ L. Untersuchungen ber den gaswechsel und energie-umsatz des radfahrers[M]. Berlin, August Hirschwald Verlag: 1899.
[35] CONGER S A, BASSETT D R. A compendium of energy costs of physical activities for individuals who use manual wheelchairs[J]. Adapted Physical Activity Quarterly, 2011, 28(4):310-325.
[36] JOHNSON MA, POLGAR J, WEIGHTMAN D,et al. Data on the distribution of fiber types in thirty-six human muscle. An antopsy study[J]. Journal of the Neurological Sciences, 1973, 18(1):111-129.
[37] 黎涌明.周期性耐力项目的训练量与强度[J].体育科学,2015,35(2):67-72.
[38] PRICE M. Energy expenditure and metabolism during exercise in persons with a spinal cord injury[J]. Sports Medicine, 2010, 40(8):681-696.
[39] SEILER S, TONNESSEN E. Intervals, thresholds, and

long slow distance: The role of intensity and duration in endurance training[J]. Sports Science, 2009, 13: 32-53.
[40] FERNÁNDEZ-GARCÍA B, PÉREZ-LANDALUCE J, RODRÍGUEZ-ALONSO M, et al. Intensity of exercise during road race pro-cycling competition[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2000, 32(5):1002-1006.
[41] MAGLISHO E. Swimming fastest. The essential reference on technique training and program design[J]. Champaign(Illinions): Human Kinetics, 2003.
[42] 江崇民,邱淑敏,王欢,等.平板运动跑台和场地环境测试走、跑运动能量消耗的比较研究[J].体育科学,2011,31(7):30-36.

(责任编辑:刘畅)

(上接第 89 页)

[19] DICKS M, BUTTON C, DAVIDS K. Availability of advance visual information constrains associa tion-football goalkeeping performance during penalty kicks [J]. Perception, 2010, 39(8):1111-1124.
[20] FISCHER M, MOSCOVITCH M, ALAIN C. Mapping 'expectation for perception': Directed attention at encoding facilitates response preparation to high probability events[J]. Psychophysiology, 2021, 58:S42.
[21] FURLEY P, DICKS M, STENDTKE F, et al. “Get it out the way. The wait's killing me.” hastening and hiding during soccer penalty kicks[J]. Psychology of Sport and Exercise, 2012, 13(4):454-465.
[22] MANN D L, SCHAEFERS T, CAÑAL-BRULAND R. Action preferences and the anticipation of action outcomes[J]. Acta Psychologica, 2014, 152:1-9.
[23] ALMASHAT S, AYOTTE B, EDELSTEIN B, et al. Framing effect debiasing in medical decision making[J]. Patient Education and Counseling, 2008, 71(1):102-107.
[24] 孙延林.不同水平体操运动员的预期与视觉搜索特征的研究[D].天津:天津师范大学,2009.
[25] DICKS M, DAVIDS K, BUTTON C. Individual differences in the visual control of intercepting a penalty kick in association football[J]. Human Movement Science, 2010, 29(3):401-411.

(责任编辑:刘畅)