

DOI:10.3724/SP.J.1008.2015.00978

心率与自觉疲劳分级在氦氧饱和潜水中潜水员机体疲劳监测中的应用

黄育敏^{1,2,3}, 张明月², 陈锐勇³, 韩先伦², 陈立², 张晓明^{1*}

1. 浙江大学医学院基础医学部, 杭州 310058
2. 南京军区杭州疗养院海勤疗养区, 杭州 310002
3. 海军医学研究所, 上海 200433

[摘要] **目的** 探讨大深度氦氧饱和潜水过程中, 心率(heart rate, HR)与自觉疲劳分级(rating of perceived exertion, RPE)在潜水员机体疲劳监测中的作用。**方法** 采用500 m饱和潜水系统模拟水下100 m压力环境: 压力为1.1 MPa; 氧分压为35~52 kPa; 二氧化碳分压<0.5 kPa; 高压暴露期间温度为(31.0±1.7)℃; 相对湿度为(76.8±3.5)%。呼吸气体为氦氧混合气。选取6个时段检测18名潜水员的HR与RPE值, 包括:(1)入舱前1天;(2)到达100 m稳压第1天;(3)100 m运动负荷至峰值;(4)100 m稳压第2天;(5)出舱后第1天;(6)出舱后第7天。所得数据采用SPSS 17.0进行统计学配对 t 检验及相关性分析。**结果** 从入舱前1天至到达100 m稳压第1天, HR下降并具有统计学意义($P<0.05$); 从出舱后第1天至出舱后第7天, HR升高并具有统计学意义($P<0.05$)。入舱后的基础RPE值与入舱前相比差异均有统计学意义($P<0.05$)。在100 m稳压阶段的运动负荷试验中, HR与RPE变化呈一致性, 且峰值时测得的数据与到达100 m稳压当天基础值相比差异有统计学意义($P<0.05$)。潜水员RPE值与HR呈高度相关($r=0.734, P<0.01$)。**结论** HR和RPE可以作为潜水员大深度氦氧饱和潜水时机体疲劳监测指标。

[关键词] 心率; 自觉疲劳分级量表; 疲劳; 氦氧饱和潜水

[中图分类号] R 845.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2015)09-0978-05

Application of heart rate and rating of perceived exertion scale in monitoring physical fatigue in divers during heliox saturation diving

HUANG Yu-min^{1,2,3}, ZHANG Ming-yue², CHEN Rui-yong³, HAN Xian-lun², CHEN Li², ZHANG Xiao-ming^{1*}

1. School of Basic Medical Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China
2. Hangzhou Convalescent Hospital, PLA Nanjing Military Area Command, Hangzhou 310002, Zhejiang, China
3. Naval Medical Research Institute, Shanghai 200433, China

[Abstract] **Objective** To study the application of heart rate(HR) and rating of perceived exertion(RPE) scale in monitoring the physical fatigue in the divers during the 100 msw heliox saturation diving. **Methods** The 100 msw pressure environment was simulated by a 500 msw saturation diving system: pressure was 1.1 MPa; oxygen partial pressure was 35-52 kPa; carbon dioxide partial pressure was <0.5 kPa; the temperature during exposure to high pressure was (31.0±1.7)℃; and the relative humidity was (76.8±3.5)%. Respiratory gas was heliox. The 18 divers' HR and the scores of RPE scale were recorded at 6 time points, including (1)the day before the subjects entered the chamber; (2) the first day that the subjects were exposed to 100 msw pressure environment; (3) the peak of the subject physical exercise load test under 100 msw pressure environment; (4) the second day under 100 msw pressure environment; (5) the first day that the subjects were out of the chamber; and (6) the seventh day that the subjects were out of the chamber. All the data were analyzed with paired-samples t -test. The correlation was analyzed with Pearson correlation. **Results** From the day before the subjects entered the chamber to the first day that the subjects were exposed to 100 msw pressure environment, the resting HR of subjects was significantly decreased ($P<0.05$); From the first day that the subjects were out of the chamber to the seventh day that the subjects were out of the chamber, the resting HR was significantly increased ($P<0.05$). Significant differences were also found in the basic RPE

[收稿日期] 2015-01-21 **[接受日期]** 2015-04-28

[基金项目] 全军后勤“十一五”科研基金重大项目(AHJ06J006). Supported by the Key Program of “11th-Five-Year” Science Research Fund of PLA General Logistics (AHJ06J006).

[作者简介] 黄育敏, 硕士生. E-mail: afrahym@gmail.com

* 通信作者 (Corresponding author). Tel: 0571-87341726, E-mail: zxm@zju.edu.cn

score of the subjects between before entering the chamber and after entering the chamber ($P < 0.05$). During the 100 msw heliox saturation, with the variable physical work loads, the trend of heart rate changes was still in accordance with the score of RPE scale, with that measured at the peak of the subject physical exercise load test under 100 msw pressure being significantly different from that measured at the first day the subjects were exposed to 100msw pressure ($P < 0.05$). The RPE score was significantly related with the HR of divers ($r = 0.734$, $P < 0.01$). **Conclusion** The combined application of HR and RPE scale can monitor the physical fatigue of the divers during 100msw heliox saturation diving.

[Key words] heart rate; rating of perceived exertion; fatigue; heliox saturation diving

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2015, 36(9): 978-982]

研究表明, 高压环境下, 潜水员心率 (heart rate, HR) 减慢, 心肌耗氧量明显增加, 心脏负荷增加^[1-3], 与之伴随的突出问题是机体疲劳的累积^[1,4]。但目前对潜水员机体疲劳监测的研究却少有报道。本研究根据饱和潜水临场医学保障即时、有效、简便、安全、无创的要求, 选取了既能反映心脏机能状态又能反映机体机能状态的生理指标——HR^[5-7], 结合在常压环境中既能反映机体整体主观疲劳感觉又能反映客观生理机能变化的自觉疲劳分级 (rating of perceived exertion, RPE) 量表^[8], 探讨这两个指标在监测潜水员机体疲劳过程中的应用情况, 以期作为潜水员安全作业临场医学保障提供实验依据。

1 资料和方法

1.1 研究对象 选取男性职业潜水员 18 名, 年龄 26~39 岁, 身高 168.5~180 cm, 体质量 62~88 kg, 潜水工龄 5~18 年, 无减压病史, 并且参加过多次氦氧饱和潜水。经多次全面体检, 无呼吸系统、心血管系统和其他系统疾病, 符合饱和潜水要求。

1.2 模拟饱和潜水环境参数 本实验在 500 m 饱和潜水系统中进行。模拟水下 100 m 压力环境: 压力为 1.1 MPa, 氧分压为 35~52 kPa, 二氧化碳分压为 < 0.5 kPa; 高压暴露期间温度为 $(31.0 \pm 1.7)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(76.8 \pm 3.5)\%$ 。呼吸气体为氦氧混合气。

1.3 模拟饱和潜水过程 第 1 天先用氦氧混合气加压到 10 m, 使舱内氧分压达到 40 kPa, 改用纯氦气逐步加压至 100 m, 维持该饱和深度 49 h。加压和饱和逗留期间维持氧分压 35~45 kPa。其间 18 名潜水员进行 113 m 湿舱巡回潜水 2 h。第 4~8 天, 逐步减压, 减压时维持氧分压 48~52 kPa, 减压至 12 m 后, 维持氧浓度在 21%~23%, 二氧化碳分压始终控制在 0.5 kPa 以内。第 8 天降至常压, 出

舱。潜水员高压暴露 175 h。

1.4 观察指标与方法 选取以下 6 个测量点测量潜水员的 HR 与 RPE 值: (1) 入舱前 1 天晨起 (T1); (2) 到达 100 m 稳压第 1 天晨起 (T2); (3) 100 m 运动负荷至峰值 (T3); (4) 100 m 稳压第 2 天晨起 (T4); (5) 出舱后第 1 天晨起 (T5); (6) 出舱后第 7 天晨起 (T6)。

1.4.1 HR 的采集 安静 HR 采集: 即清晨起床前清醒状态下卧位的脉搏数。晨起之后, 18 名潜水员自测左手手腕动脉 HR, 测量 15 s, 4 次。

运动时峰值 HR 的采集: 在到达 100 m 稳压阶段, 对潜水员进行运动负荷试验, 无负荷 (静息状态), 3 min; 30 W, 3 min; 60 W, 3 min; 90 W, 3 min。运动负荷过程中采用遥感监测胸前 HR, 至峰值即 90 W 第 3 分钟时, 记录 HR 值。

1.4.2 RPE 采用 Borg 改良 10 级 (1~10) RPE 量表的主观评价方法。该量表是由 Borg 等于 1979 年提出的一种推测运动强度的方法, 引进之后经改良已在国内外运动研究领域成熟应用^[9-10]。在晨起自测 HR 之后, 由 18 名潜水员独立填写量表, 完成自我评价。在运动至峰值时, 由潜水员手指指出自我感觉的等级, 由专业实验员记录。

1.5 统计学处理 采用 SPSS 17.0 软件进行统计学分析。实验中测得 HR 值和 RPE 值不同时间点 (T1 与 T2、T4、T5、T6, T2 与 T3, T2 与 T4, T5 与 T6) 的比较采用配对 t 检验, HR 值与 RPE 值的关系采用 Pearson 相关性分析。所有数据均以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 检验水准 (α) 为 0.05。

2 结果

2.1 模拟 100 m 氦氧饱和潜水过程中 HR 值

2.1.1 加压阶段与出舱后阶段的数值 从表 1 可见: T2 时 HR 值比 T1 时下降, 差异有统计学意义

($P < 0.05$)。T5 为回到常压状态第 1 天,此时 HR 值与 T1 时相比差异有统计学意义($P < 0.05$)。经过 1 周适应之后,T6 时 HR 比 T5 时升高,差异有统计学意义($P < 0.05$),同时,T6 时 HR 值接近于 T1 时的水平。

2.1.2 高压稳压运动负荷及减压阶段的数值 T2、T3 与 T4 时的 HR 为在 100 m 压力环境下同运动负荷的 HR 值,T3 时的 HR 值与 T2 时相比上升,差异具有统计学意义($P < 0.05$);T4 时 HR 与 T3 时相比下降($P < 0.05$),接近 T2 时的 HR 值。详见表 1。

2.2 模拟 100 m 氮氧饱和潜水过程中 RPE 值

2.2.1 加压阶段与出舱后阶段的数值变化 由表 1 可见:在加压阶段中(从 T1 到 T2),RPE 值上升,与 HR 值的下降呈现不匹配状态。而在 T2、T3、T4 时的 RPE 变化与 T2、T3、T4 时的 HR 变化呈高度一致性,在 100 m 压力环境下,运动负荷至峰值(T3)时,HR 到达最大值,RPE 也到达最大值,与 T2 时相比差异有统计学意义($P < 0.05$)。经一夜休息后,T4 时 RPE 回落到 T2 时的相似水平。

表 1 各测量点 HR 与 RPE 值测试结果

Tab 1 Results of HR and RPE measured at different time points

Time point	Air pressure p/MPa	HR f/min^{-1} , $n=18, \bar{x} \pm s$	RPE $n=18, \bar{x} \pm s$
T1	0.1	77.17 ± 3.88	1.72 ± 0.46
T2	1.1	69.72 ± 6.02*	3.22 ± 0.43*
T3	1.1	109.44 ± 12.07 Δ	5.28 ± 0.89 Δ
T4	1.1	68.33 ± 6.03*	3.28 ± 0.46*
T5	0.1	67.39 ± 4.96*	3.11 ± 0.32*
T6	0.1	75.39 ± 4.16 \blacktriangle	2.61 ± 0.50* \blacktriangle

HR: Heart rate; RPE: Rating of perceived exertion. T1: The morning that the subjects just woke up without any physical activities and before the subjects entered the chamber; T2: The first morning that the subjects were exposed to 1.1 MPa; T3: The peak of the subjects physical exercise load test under 1.1 MPa, the second point and the third were on the same day; T4: The morning of the second day under 1.1 MPa; T5: The morning of the first day decompressed to 0.1 MPa out of the chamber; T6: The morning of the seventh day out of the chamber. * $P < 0.05$ vs T1; $\Delta P < 0.05$ vs T2; $\blacktriangle P < 0.05$ vs T5

2.2.2 高压稳压运动负荷及减压阶段的数值 由表 1 可见:与常压 T1 时相比,经加压后的 T2 时与 T4 时 RPE 值明显升高,差异有统计学意义($P < 0.05$);出舱后回到常压第 1 天(T5)与 T4 时比较,RPE 值有所下降,但与 T1 时相比差异仍有统计学意义($P < 0.05$);出舱 1 周之后(T6)与 T5 时相比 RPE 值有所下降,略高于 T1 时,与两者相比差异均有统计学意义($P < 0.05$)。

2.3 HR 值与 RPE 值之间的相关性 各个测试点潜水员 HR 与 RPE 值的 Pearson 相关性分析结果见图 1,可见 HR 与 RPE 呈高度相关性($r = 0.734, P < 0.01$)。

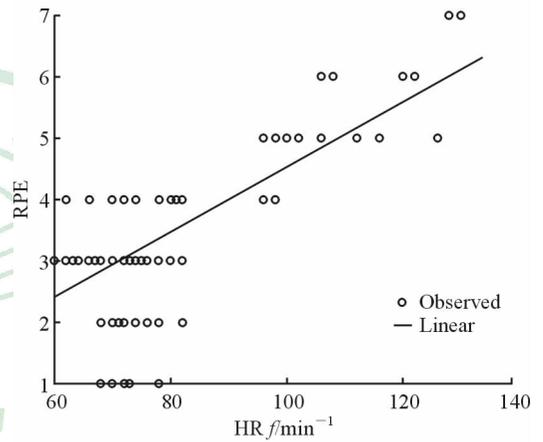


图 1 HR 与 RPE 的相关性分析

Fig 1 Relationship between HR and RPE

HR: Heart rate; RPE: Rating of perceived exertion. Pearson correlation analysis, $r = 0.734, P < 0.01$

3 讨论

3.1 HR 结合 RPE 判断潜水员机体疲劳的有效性 本研究结果显示:HR 在加压过程(T1 到 T2)中下降,在减压之后的过程(T5 到 T6)中升高,这与之前的研究结果相同^[11-12]。潜水过程中,HR 减慢是由于环境高压引起,是机体为对抗低氧损害的一种防卫机制,并且只与高压有关,与呼吸气体及潜水深度无关^[12-13]。在高压环境中由于高压因素导致心动过缓,此时检测 HR 可能低估了机体负荷;而在减压之后由于减压因素导致心动过速,此时检测 HR 又可能高估了机体负荷^[5]。因此在环境气压改变过程中,仅从 HR 这个单一的指标未必能有效、准确的判断潜水员的机体疲劳。所以,本研究引入 RPE 值,通过这两个指标的共同监测,以达到对机

体状况的准确反映。

3.2 加压阶段及出舱阶段 HR 和 RPE 的变化分析 本研究结果显示:在加压阶段及出舱阶段中,主观 RPE 值与客观 HR 呈现不匹配状态。

在加压阶段(T1 到 T2),由于高压引起的高压神经综合征(high pressure neurological syndrome, HPNS)^[1],使潜水员出现眩晕、乏力、胃纳差、睡眠质量下降等不适症状,HR 的下降,表面上反映机体的自我适应,而 RPE 的升高($P < 0.05$),表明实际机体的异常疲劳,这与之前参加大深度氮氧饱和潜水的潜水员所反应的情况^[14-15]相符。同时,经过增加停留站、稳压适应等处理之后,在安全到达 100 m 目标深度(1.1 MPa),潜水员仍有不适感,反映在 RPE 值的升高。因此,在加压过程中,HR 低估了机体负荷,而 RPE 值的升高,能更客观地反映机体对加压负荷应激的真实情况。

在出舱阶段(T5 到 T6),T5 与 T1 相比,HR 的下降和 RPE 的升高均有统计学意义($P < 0.05$),说明经过整个饱和潜水过程,潜水员机体有疲劳累积。经过 1 周恢复后,T6 与 T5 相比,RPE 下降($P < 0.05$),而 HR 升高($P < 0.05$)。T6 与 T1 相比,RPE 升高($P < 0.05$),HR 下降但差异无统计学意义。因此,在出舱阶段,HR 高估了机体负荷,从 RPE 值的下降,表明机体的自我适应,但 T6 的 RPE 仍高于 T1,提示潜水员机体恢复至加压前水平,或许需要更长的时间。

3.3 高压稳压运动负荷及减压阶段中 HR 和 RPE 的变化分析 在高压稳压给予运动负荷及减压阶段(T2 到 T5)中,潜水员 RPE 与 HR 之间则呈现出相同的变化趋势,即,先升高后降低,且同一性高。

在高压稳压阶段(T2 到 T4),T3 为与 T2 的同一天,T3 是给予运动负荷试验至峰值时所采集的数据,与 T2 相比,HR 与 RPE 数值均显示升高($P < 0.05$),且呈现出高度的同一性:随 HR 增加,RPE 值亦随之增加。这与在常压环境中蔡启明^[16]、Katsanos 等^[17]的研究结果一致:RPE 等级与 HR 等客观生理指标间呈显著性正相关。同时 T3 与 T2 环境条件一致(100 m 高压稳压),所以,T3 的机体疲劳仅仅是由于运动负荷引起的。T4 为高压稳压第 2 天,潜水员主观反映呼吸困难,RPE 值与 T1 时相比,数值上升高($P < 0.05$),表明机体疲劳感增

加。这是由于:高压暴露时,气体密度增加,呼吸阻力增加,机体小气道功能受损,肺功能受限^[18-19]。所以 T2 与 T4 虽然环境压力相同(1.1 MPa),但造成潜水员疲劳的机制不同:T4 主要由于呼吸困难导致的机体疲劳;而 T2 主要原因是 HPNS 症状相对严重,在一定程度上转移了潜水员对呼吸困难的主观关注。同时,经过 T3 测试点之后,潜水员反映 HPNS 不适感减轻,这可能是由于运动打破了因高压导致的中枢神经系统的抑制状态^[20],所以,T4 时的 HR 与 T1 时相比有下降趋势,表明 HR 在一定程度上又低估了机体实际的疲劳程度。以上结果提示,在高压暴露的各个阶段中,潜水员机体疲劳累积的主要原因各不相同。

在减压过程(T4 到 T5)中,潜水员普遍反映睡眠时间减少、睡眠质量下降,与之前的报道^[21]相符。这与潜水员长时间限制于封闭环境中,缺少体力活动有关^[22]。HR 和 RPE 均有下降趋势,说明机体逐渐适应。然而,T5 与 T1 相比,HR 的下降低估了机体疲劳程度,而 RPE 的升高能较为客观地反映经过整个饱和潜水过程后潜水员的疲劳感。

3.4 模拟 100 m 氮氧饱和潜水过程中 HR 和 RPE 的整体趋势 相关性分析显示:HR 与 RPE 呈高度相关性($r = 0.734, P < 0.01$)。经过加压(T1 到 T2)、高压稳压负荷(T2 到 T3)、高压调整(T3 到 T4)、减压(T4 到 T5)以及出舱恢复(T5 到 T6)这 5 个阶段,HR 整体(T1 到 T6)有下降趋势($P < 0.05$),RPE 有上升趋势。提示潜水员在经过整个潜水过程后,从 HR 上表现为机体功能有一定的适应,而 RPE 的升高表明机体对疲劳仍有一定的累积,需要更长的恢复期。出舱后,所有参加实验的潜水员均无机体异常反应,表明此次饱和潜水的方案是合理的,条件控制是适当的。

潜水员暴露于高压环境下,其心脏负荷明显增加。同时由于受到 HPNS、呼吸阻力增大、睡眠紊乱等多方面影响,潜水员机体疲劳程度明显增加,甚至可能会对机体器官、功能产生一定程度的损伤,因此,在高压环境下必须对潜水员机体机能状态进行严密监测,以确保潜水员在安全范围内进行潜水作业。本研究结果提示,HR 有可能低估了机体在整个过程中的疲劳程度,因此,引入 RPE 量表,通过联合检测,可能更为客观、准确地反映机体的实际情

况,为科学、安全地指导临场饱和潜水提供医学保障。本研究仅选取了HR和RPE两个指标,在此次经验累积的基础上,今后会相应增加血生化等客观有创指标,进一步完善对潜水员机体疲劳的监测。

[参考文献]

- [1] 龚锦涵. 潜水医学[M]. 北京:人民军医出版社,1985: 107-113.
- [2] 章恒笃,张振炜,王子彦,肖书浩,万振中. 3.6 MPa 氮氧饱和潜水对潜水员心功能的影响[J]. 中国应用生理, 1992, 8: 266-268.
- [3] Anderson D, Nagasawa G, Norfleet W, Olszowka A, Lundgren C. O₂ pressures between 0.12 and 2.5 atm abs, circulatory function, and N₂ elimination [J]. Undersea Biomed Res, 1991, 18: 279-292.
- [4] Vaernes R J, Bergan T, Warncke M, Ursin H, Aakvaag A, Hockey R. European isolation and confinement study. Workload and stress; effects on psychosomatic and psychobiological reaction patterns [J]. Adv Space Bio Med, 1993, 3: 95-120.
- [5] Mano Y. [Evaluation of diving stress implication of analysis of work loads][J]. Sangyo Iqaku, 1987, 29: 202-209.
- [6] Naraki N, Tomizawa G, Mohri M. Evaluation of static work load in a helium-oxygen saturation dive at 31 ATA[J]. Appl Human Sci, 1996, 15: 81-86.
- [7] Gutvik C R, Wisløff U, Brubakk A O. Use of heart rate monitoring for an individualized and time-variant decompression model[J]. Eur J Appl Physiol, 2010, 110: 885-892.
- [8] Garcin M, Vautier J F, Vandewalle H, Monod H. Ratings of perceived exertion (RPE) as an index of aerobic endurance during local and general exercises [J]. Ergonomics, 1998, 41: 1105-1114.
- [9] 田野,马鹏鹏,郭时杰,满君. 连续运动后延迟性肌肉损伤的适应性研究[J]. 中国运动医学杂志, 2003, 22: 138-142.
- [10] Huang D H, Chou S W, Chen Y L, Chiou W K. Frowning and jaw clenching muscle activity reflects the perception of effort during incremental workload cycling[J]. J Sports Sci Med, 2014, 13: 921-928.
- [11] 卢海,尹世达,杨树福,王少. 高压对心率和心脏的影响[J]. 海军医学, 1992, 10: 202-205.
- [12] Ceamitru N, Badiu G, Teren O, Petru A, Soare G. Study of heart rate of professional divers in hyperbarism during simulated diving in saturation with different respiratory mixture [J]. Rom J Physiol, 1993, 30(3-4): 179-182.
- [13] Alboni P, Alboni M, Gianfranchi L. Diving bradycardia: a mechanism of defence against hypoxic damage[J]. J Cardiovasc Med (Hagerstown), 2011, 12: 422-427.
- [14] Bennett P B, McLeod M. Probing the limits of human deep diving[J]. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 1984, 304: 105-117.
- [15] Talpalar A E, Grossman Y. CNS manifestations of HPNS: revisited[J]. Undersea Hyperb Med, 2006, 33: 205-210.
- [16] 蔡启明. 以动态心率为指标的体力疲劳的评价方法研究[J]. 人类工效学, 1999, 5: 27-29.
- [17] Katsanos C S, Moffatt R J. Reliability of heart rate responses at given ratings of perceived exertion in cycling and walking[J]. Res Q Exerc Sport, 2005, 76: 433-439.
- [18] 陈锐勇,肖卫兵,方以群,许骥,张和翔,于峰涛. 海上氮氧 150 m 饱和-182 m 巡回潜水潜水员肺功能的变化[J]. 中华航海医学与高压医学杂志, 2003, 10: 17-20.
- [19] Yamasaki M, Taya Y, Fujie K, Seki K, Sasaki T, Nakayama H. Effect of a simulated saturation dive to 31 ATA on pulmonary function [J]. Ann Physiol Anthropol, 1986, 5: 191-196.
- [20] 肖卫兵,张振炜,陈龙飞,潘令松. 4.6 MPa 氮-氧暴露时小鼠脑干扰发电位和脑电变化的初步观察[J]. 中华航海医学与高压医学杂志, 2001, 8: 176-178.
- [21] Lemaire C, Murphy E L, Gourret P, Monod H. Quantifying fatigue in working divers[J]. Aviat Space Environ Med, 1978, 49: 1160-1167.
- [22] Nagashima H, Matsumoto K, Seo Y J, Mohri M, Naraki N, Matsuoka S. Changes in sleep patterns during simulated nitrox saturation diving to 20 and 30 meters[J]. Percept Mot Skills, 2002, 94(3 Pt 1): 753-766.