



2025 年东京世界田径锦标赛 女子 4×100m 接力赛运动生物 力学技术分析报告

¹日本国立体育科学中心（JISS），日本高水平竞技体育中心（HPSC）；²日本田径联合会科学委员会；³熊本学园大学；⁴ 久留米大学；⁵ 神户女子大学；⁶ 世界田联健康与科学部。



目录表

导言	2
方法	2
运动表现与测量	2
关键表现指标的定义	4
统计学分析	4
结果	5
比赛总结	5
接棒区及交接棒表现	5
各团队分析	7
接棒区和个人接棒区时间分析	15
接棒区平均次数	15
每次接力棒交换时的接力区时间	16
接力棒最低速度	17
接力棒交换位置	18
统计关系	19
主要发现与启示	20
贡献者	21
联系方式	22
参考资料	22

引言

4×100 米接力是一项高度复杂的运动项目，它将个人短跑表现与接力棒交换的技术要求结合在一起。虽然整体接力赛的成功与否在很大程度上取决于团队成员的综合冲刺能力，但接力棒交换的效率对最终的结果会产生实质性的影响。潜在地执行良好的接力棒交换可能会使个人短跑运动员相对较慢的团队胜过短跑速度优越的竞争对手。因此，这一技术层面为团队提供了一个独特的机会，让他们获得超越个人短跑能力的竞争优势。

接力棒交换的功效很可能取决于保持接力棒速度;前棒不必要的减速或后棒加速不足会降低这个速度，从而损害整个接力的表现。这些速度变化是如何在精英比赛中发生的，具体来说，是如何通过交换来保持速度的，以及在接力棒之前，跑出去的运动员是否达到了足够的加速度，这些问题很少得到研究。此外，接力棒交换的时间和位置等战略因素可能会影响接力棒交换效率，但这些关系在很大程度上仍未得到探索。因此，建议对这些技术和战略因素及其与接力棒交换结果的关系进行全面调查。

这个生物力学项目的目的是分析优秀女子 4×100 米接力队的接力棒交换技术及其与比赛表现的关系。

方法

运动表现与测量

对参加 2025 年东京世界田径锦标赛女子 4×100 米接力决赛的 8 支队伍进行了分析。7 台手动操作的高速摄像机(239.76 fps, Lumix DC-GH6 或 DC-GH7, 松下, 日本)的位置如图 1 所示，从起点到终点连续捕捉各队的选手。所有的录像都是通过发令枪发出的闪光信号进行同步的。

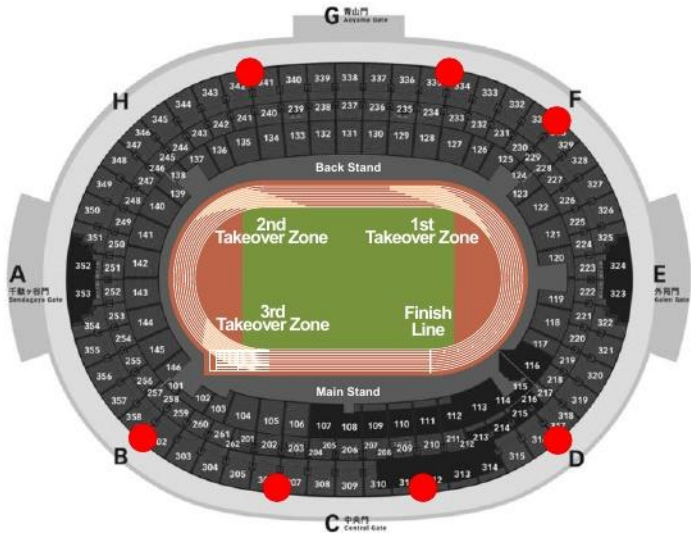


图 1. 场馆内的摄像机布局。

使用我们的专利技术从视频数据中确定每个跑步者的位置。简单地说，视频图像是使用接棒区线、起跑线和跨栏标记等轨迹标记逐帧校准的。赛道上的全局坐标系根据之前的文献 4 进行定义:原点设置在终点线上的路边，x 轴在终点线上指向外，y 轴在主场直线上与跑步方向对齐，z 轴垂直。使用开源姿态估计库 (MMpose5) 获得每个视频帧中每个运动员躯干上缘位置的置信度分布。然后通过最大化所有摄像机视图的置信度得分的乘积来重建全局坐标系中的三维位置(图 2)。在某些帧中，躯干上缘位置估计受到遮挡(例如，通过扔笼子)或重叠运动员的影响，导致重建误差;这些都被目视检查、移除，并作为缺失的数据点处理。使用平滑样条函数(SciPy 1.11.3)及其自动确定的参数进行光平滑和缺失数据插值。



图 2.来自同步多摄像头视频的运动员位置三维重建。对于有代表性的运动员，估计的躯干上缘位置(红圈)及其在 ±0.25 s 内的轨迹(绿线和圆圈)被覆盖在每个摄像机视图上。

随后，将重建的三维位置投影到跑道测量线上最近的点 6 上，以获得跑步者沿着跑道的位置(以下简称“原始跑步位置”)。对这些原始位置数据进行微分会在计算的跑步速度中引入阶跃波动和放大的噪声。为了捕捉速度变化的宏观趋势，使用截止频率为 0.5 Hz 的 Butterworth 低通滤波器对原始跑步位置进行处理(图 3)。然后，过滤后的数据用于计算表 1 中列出的跑步者的速度和表现指标。经视频数据证实，接力棒交换开始定义为接力棒与后棒的手第一次接触的时刻，接力棒交换完成定义为接力棒从前棒手中释放的时刻。

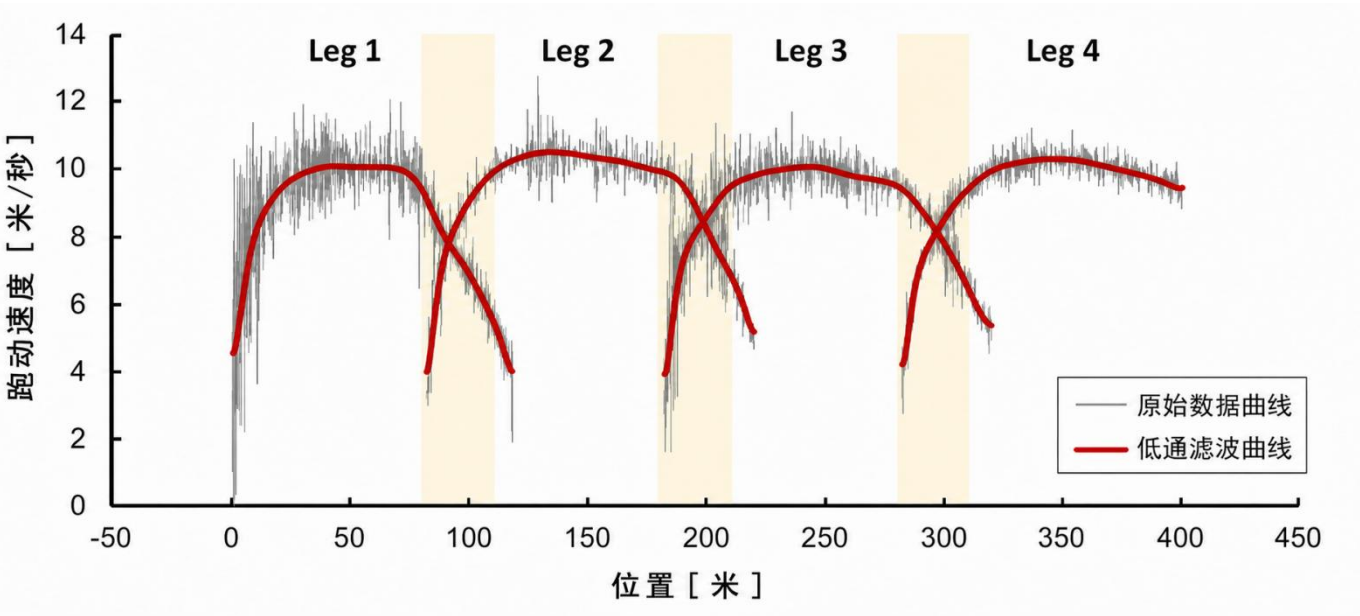


图 3. 低通滤波对运行速度曲线的影响(典型例子)。注:阴影区域表示接棒区域。

表 1. 关键表现指标的定义。

参数	单位	定义
完成时间 Finish Time	s	接力比赛的完赛时间。
接力区用时 Takeover Zone Time	s	在接力区内的用时；从传棒运动员进入接力区起，至接棒运动员离开接力区止。
各棒跑动区用时 Individual Leg Zone Time	s	每一棒运动员在其个人跑动区内的用时。
传棒运动员速度 Incoming Runner Velocity	m/s	传棒运动员在接力棒交接完成时的跑速。
接棒运动员速度 Outgoing Runner Velocity	m/s	接棒运动员在接力棒交接完成时的跑速。
接力棒最低速度 Bottom Velocity of Baton	m/s	接力棒交接过程中，传棒或接棒运动员的最低跑速，代表接力棒的最低速度。
交棒位置 Baton Exchange Position	m	接力棒交接完成时，接棒运动员在接力区内的位置。
交棒持续时间 Baton Exchange Duration	s	完成接力棒交接所需的时间，从交接开始至交接完成。
自由距离 Free Distance	m	接力棒交接完成时，传棒运动员与接棒运动员之间的距离。

注:所有基于时间的指标报告四舍五入到最接近的百分之一秒;因此，由于四舍五入的原因，组成时间(例如，接棒区时间和个人腿区时间)的总和可能不完全等于报告的完成时间。

统计学分析

接棒区域时间与相关指标之间的相关性进行了测试，即接力棒的最低速度，接力棒交换位置，持续时间和自由距离。我们汇集了第一次、第二次和第三次接力棒交换的所有数据进行分析，排除了不合格的接力棒交换。使用相应的 p 值 ($\alpha = 0.05$) 评估相关系数的统计显著性，而根据 Cohen 的常规标准评估关联强度[7]；在。300 到。499 之间的绝对系数代表中等关联，超过。500 的绝对系数代表大关联。

结果

比赛总结

表 2 总结了被分析队的比赛结果和背景信息。100 米赛季最佳记录作为团队成员个人冲刺能力的参考指标呈现。值得注意的是，基于四棒 100 米赛季最好成绩平均值的排名与实际比赛结果并不匹配，这表明接力赛表现不能仅仅用个人短跑能力来解释。这种差异突出了接力棒特定因素的重要性，特别是接力棒交换表现。

表 2。女子 4×100 米接力决赛参赛队伍的比赛结果和背景信息。

名次	代表队	号码布代码	道次	完赛成绩 (秒)	100米赛季最好成绩 平均值 (秒)	接力成绩相较于个人100米成绩总和的 时间收益 (秒)
1	美国	USA	5	41.75 (1)	10.81 (1)	1.49 (6)
2	牙买加	JAM	6	41.79 (2)	10.88 (2)	1.73 (5)
3	德国	GER	8	41.87 (3)	11.14 (5)	2.69 (2)
4	英国及北爱尔兰	GBR	4	42.07 (4)	11.02 (3)	2.00 (4)
5	西班牙	ESP	7	42.47 (5)	11.34 (8)	2.87 (1)
6	法国	FRA	9	42.81 (6)	11.30 (7)	2.38 (3)
7	加拿大	CAN	2	42.82 (7)	11.07 (4)	1.47 (7)
—	波兰	POL	3	DQ*	11.18 (6)	NA**

注：括号内数字为该指标排名；DQ=取消比赛资格；NA=无法计算。

注:100 米季节最好记录来自世界田径网站。对于没有官方 100 米赛季最佳记录的运动员，使用世界田径计分表从 200 米或 100 米跨栏赛季最佳记录中估计出等效值。“接力与个人表现差”的计算方法是:四腿 100 米个人季节最好成绩减去官方接力结束时间;较大的值表示相对于个人冲刺表现获得更多的时间。括号内的数值表示所列力队的排名。
*43.28(8)和**1.42(8)来源于我们的分析数据。

接棒区及交接棒表现

团队特定的结果显示在图 4 和表 3 中。图 4 中上部的面板显示了每个接棒区域周围传入和后棒的运行速度概况。接力棒交换的开始用红色开圈表示，完成用红色填充圈表示，接力棒交换过程中覆盖的距离用红线表示。

在整个团队中，入组的跑步者在接力棒交换之前的跑步速度通常会逐渐降低，而出组的跑步者在开始跑步后表现出快速的加速。这些速度变化的幅度因团队和接力棒交换而异。在某些情况下，进入的跑者在接棒区域内的减速比在长时间最大跑时自然速度下降所预期的要剧烈，这表明积极的速度调整以保持与离开的跑者的适当距离。在其他情况下，即将跑出的跑者在接棒区域内降低了加速度，这表明他们在等待到来的跑者时延迟了加速度。这两种模式都与较低的接力棒最低速度有关。这些速度分布说明，交换过程中的接力棒速度是由两名跑步者同时的速度状态决定的。

图 4 的下面板按照区域发生的顺序显示了接棒区域时间(红色元素)以及单个个人接棒区域时间(灰色元素)。图 5 比较了团队之间的这些值，显示接棒区域时间差异很大。图 6 展示了每支力队三次接力棒交换的平均接力区时间。图 7 进一步详细说明了每次接力棒交换的接力区域时间。指挥棒交换表现的可变性在团队之间和同一团队内不同的接棒区域都很明显。

图 8 显示了每次接力棒交换时接力棒的最低速度。较短的接棒区域时间通常与较高的最低速度相关，这表明指挥棒速度维持与指挥棒交换表现之间存在密切关系。

图 9 总结了接棒区内的接力棒交换位置。红线和大数表示交换位置，方括号内的值表示自由距离。对于每支队伍，上下条分别代表进站和出站选手的跑动范围，彩色范围表示接力棒交换的位置。接力棒交换位置变化很大，从接近接力区中部到接近接力区末端，自由距离也有很大差异。

图 10 说明了接棒区域时间和相关表现指标之间的关系。接力棒的最低速度在很大程度上与接棒区时间相关。相反，接力棒交换位置和持续时间与接棒区时间不显著相关，而自由距离则表现出中度但显著的相关性。

美国

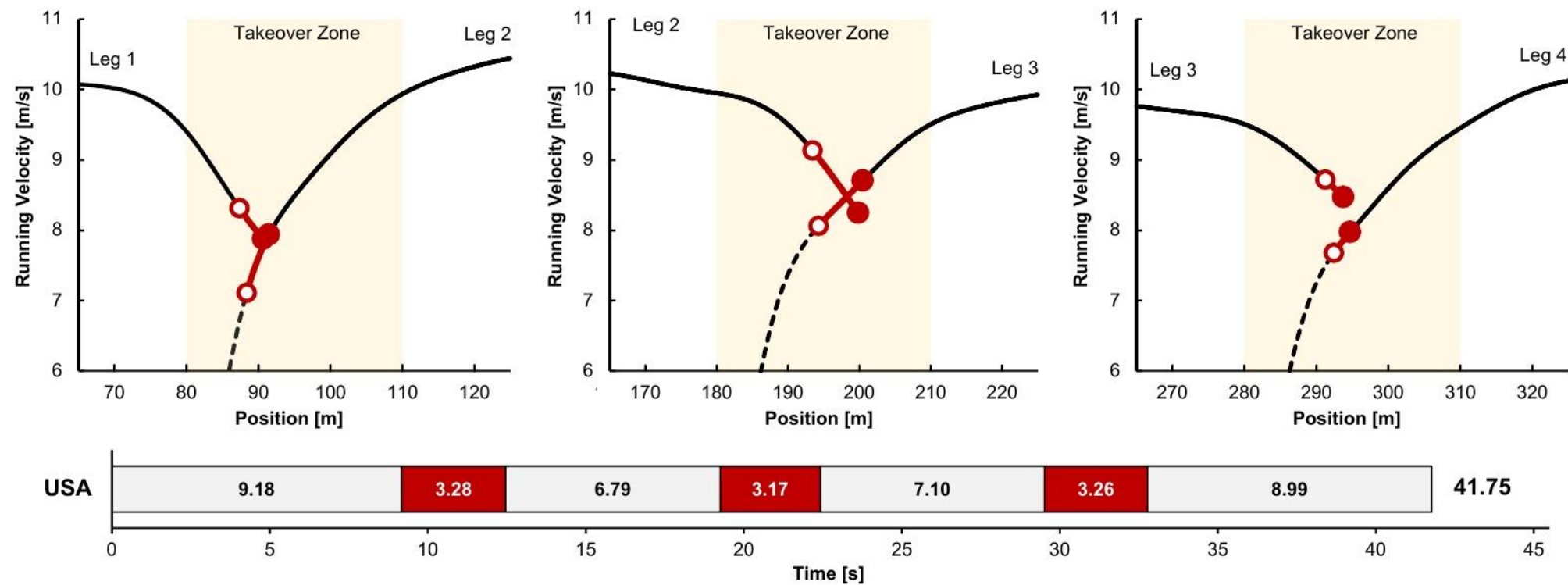


图 4-1。美国队在女子 4×100 米接力决赛中的跑动速度和接力棒交换表现。

表 3-1。美国队在女子 4×100 米接力决赛中的表现指标。

Baton Exchange	Velocity at Baton Exchange [m/s]		Bottom Velocity of Baton [m/s]	Baton Exchange Position [m]	Baton Exchange Duration [s]	Free Distance [m]
	Incoming Runner	Outgoing Runner				
Leg 1 to Leg 2	7.88	7.94	7.88	11.5	0.41	0.80
Leg 2 to Leg 3	8.25	8.71	8.25	20.5	0.74	0.64
Leg 3 to Leg 4	8.47	7.98	7.98	14.7	0.29	0.95

牙买加

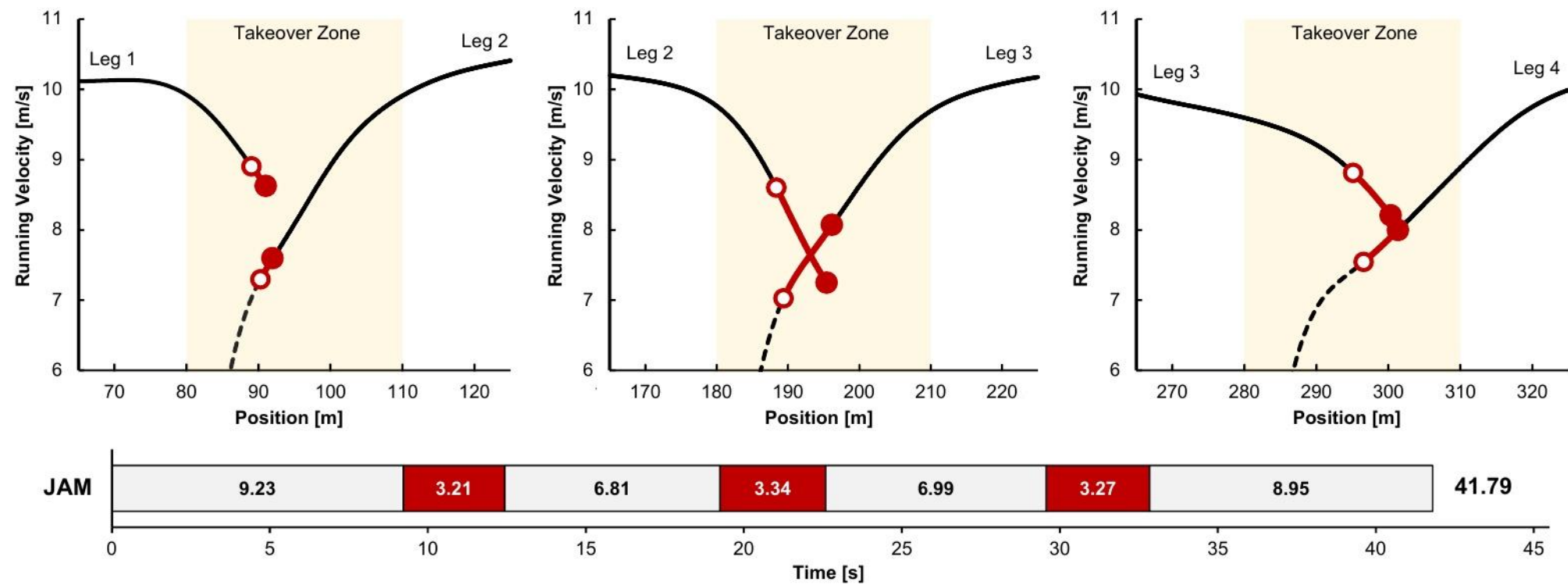


图 4-2。牙买加队在女子 4×100 米接力决赛中的跑动速度和接力棒交换表现。

表 3-2。牙买加队在女子 4×100 米接力决赛中的表现指标。

Baton Exchange	Velocity at Baton Exchange [m/s]		Bottom Velocity of Baton [m/s]	Baton Exchange Position [m]	Baton Exchange Duration [s]	Free Distance [m]
	Incoming Runner	Outgoing Runner				
Leg 1 to Leg 2	8.63	7.60	7.60	12.0	0.23	0.94
Leg 2 to Leg 3	7.25	8.07	7.25	16.2	0.90	0.73
Leg 3 to Leg 4	8.21	8.00	8.00	21.3	0.62	0.99

德国

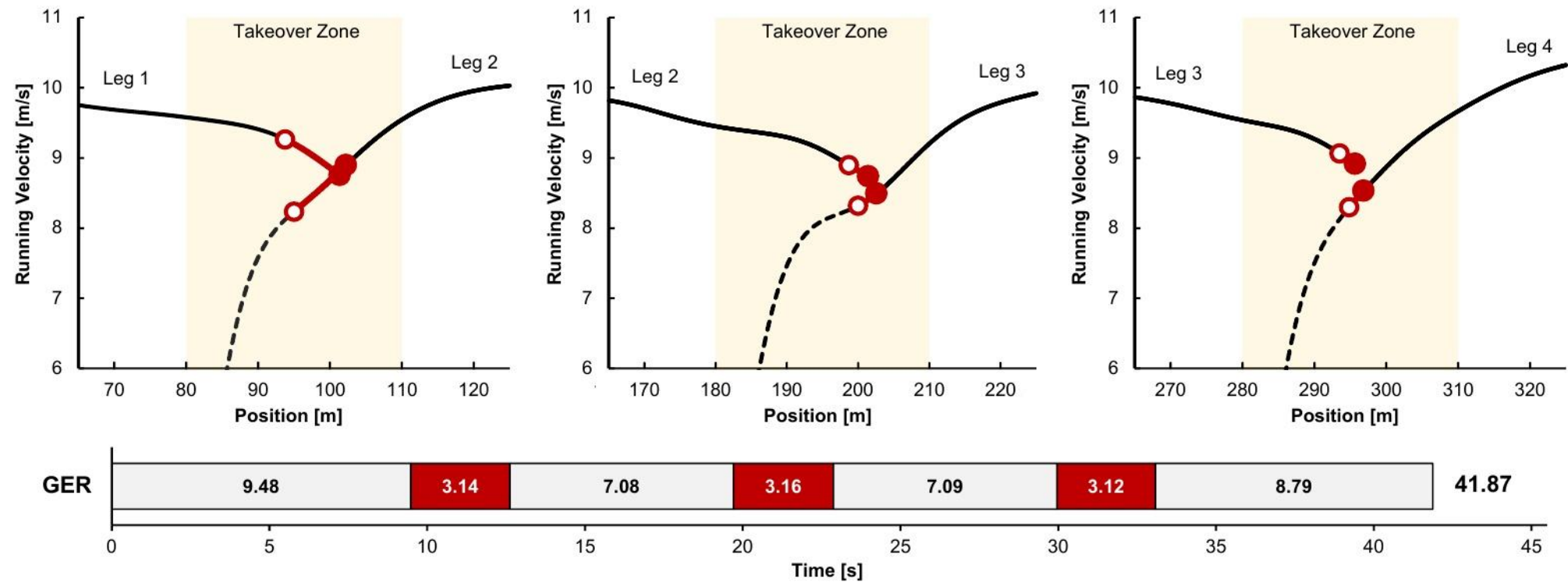


图 4-3。德国队在女子 4×100 米接力决赛中的跑动速度和接力棒交换表现。

表 3-3。德国队在女子 4×100 米接力决赛中的表现指标。

Baton Exchange	Velocity at Baton Exchange [m/s]		Bottom Velocity of Baton [m/s]	Baton Exchange Position [m]	Baton Exchange Duration [s]	Free Distance [m]
	Incoming Runner	Outgoing Runner				
Leg 1 to Leg 2	8.76	8.90	8.76	22.2	0.84	0.85
Leg 2 to Leg 3	8.74	8.49	8.49	22.6	0.31	1.19
Leg 3 to Leg 4	8.92	8.53	8.53	16.8	0.24	1.19

英国

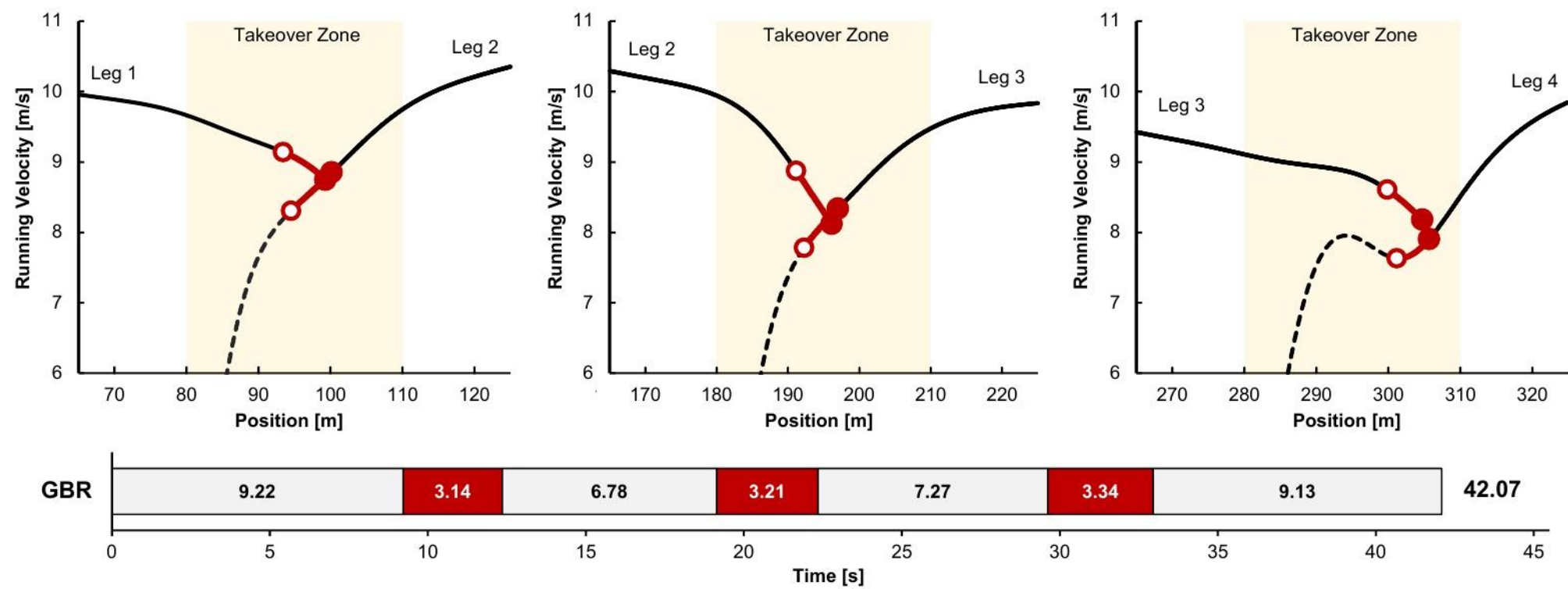


图 4-4。英国队在女子 4×100 米接力决赛中的跑动速度和接力棒交换表现。

表 3-4。英国队在女子 4×100 米接力决赛中的表现指标。

Baton Exchange	Velocity at Baton Exchange [m/s]		Bottom Velocity of Baton [m/s]	Baton Exchange Position [m]	Baton Exchange Duration [s]	Free Distance [m]
	Incoming Runner	Outgoing Runner				
Leg 1 to Leg 2	8.75	8.85	8.75	20.2	0.66	0.86
Leg 2 to Leg 3	8.12	8.34	8.12	17.0	0.59	0.87
Leg 3 to Leg 4	8.18	7.90	7.90	25.7	0.58	0.91

西班牙

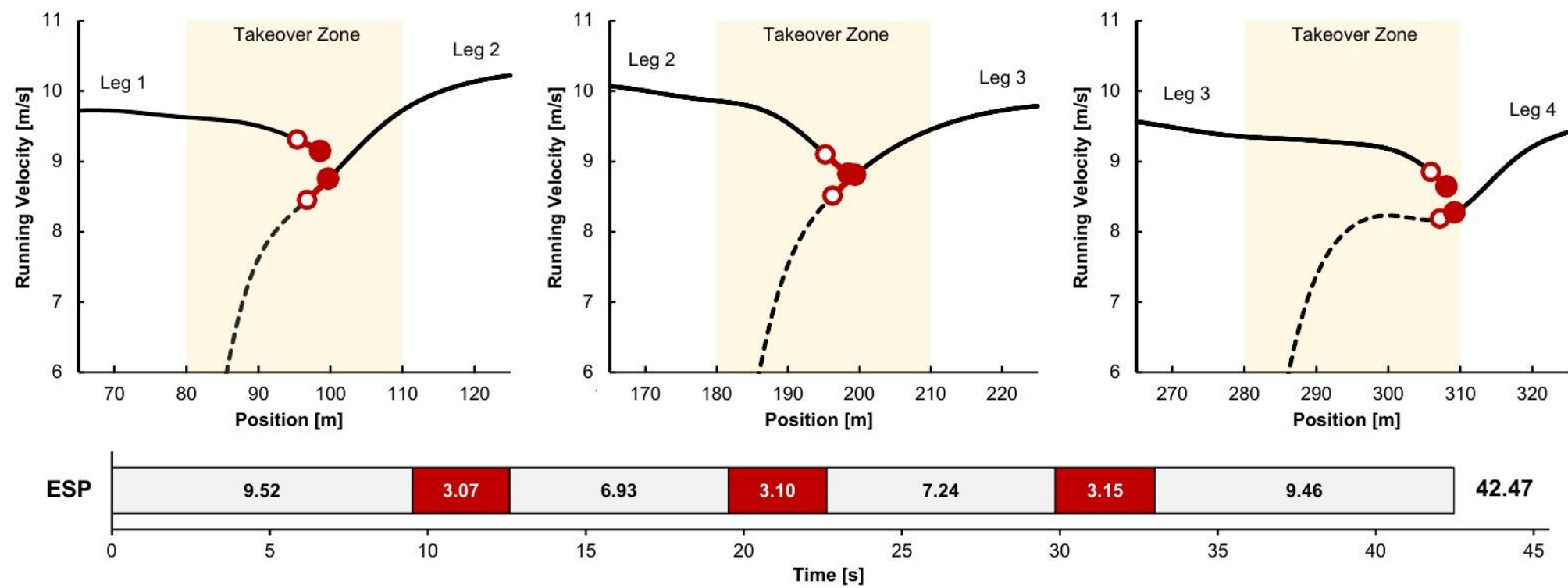


图 4-5。西班牙队在女子 4×100 米接力决赛中的跑动速度和接力棒交换表现。

表 3-5。西班牙队在女子 4×100 米接力决赛中的表现指标。

Baton Exchange	Velocity at Baton Exchange [m/s]		Bottom Velocity of Baton [m/s]	Baton Exchange Position [m]	Baton Exchange Duration [s]	Free Distance [m]
	Incoming Runner	Outgoing Runner				
Leg 1 to Leg 2	9.15	8.75	8.75	19.7	0.35	1.14
Leg 2 to Leg 3	8.82	8.81	8.81	19.4	0.37	0.94
Leg 3 to Leg 4	8.64	8.27	8.27	29.2	0.25	1.13

法国

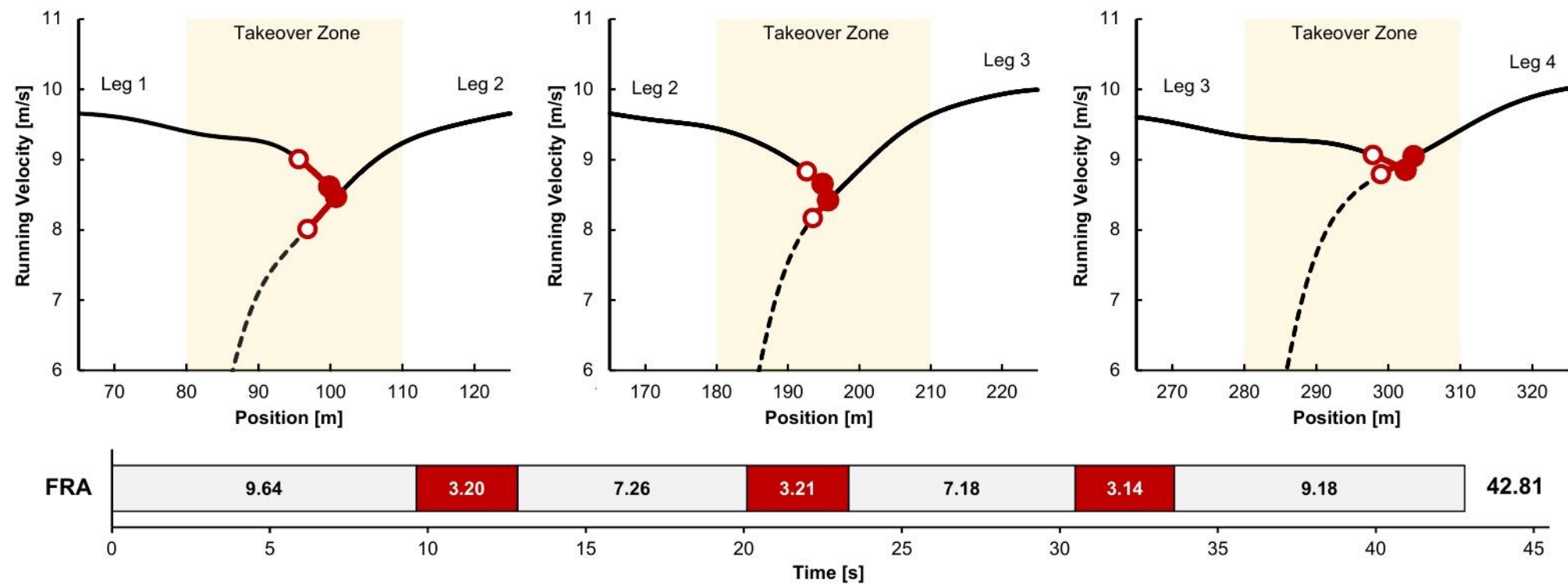


图 4-6。法国队在女子 4×100 米接力决赛中的跑动速度和接力棒交换表现。

表 3-6。法国队在女子 4×100 米接力决赛中的表现指标。

Baton Exchange	Velocity at Baton Exchange [m/s]		Bottom Velocity of Baton [m/s]	Baton Exchange Position [m]	Baton Exchange Duration [s]	Free Distance [m]
	Incoming Runner	Outgoing Runner				
Leg 1 to Leg 2	8.61	8.47	8.47	20.8	0.48	0.93
Leg 2 to Leg 3	8.65	8.42	8.42	15.6	0.26	0.76
Leg 3 to Leg 4	8.85	9.05	8.85	23.6	0.51	1.12

加拿大

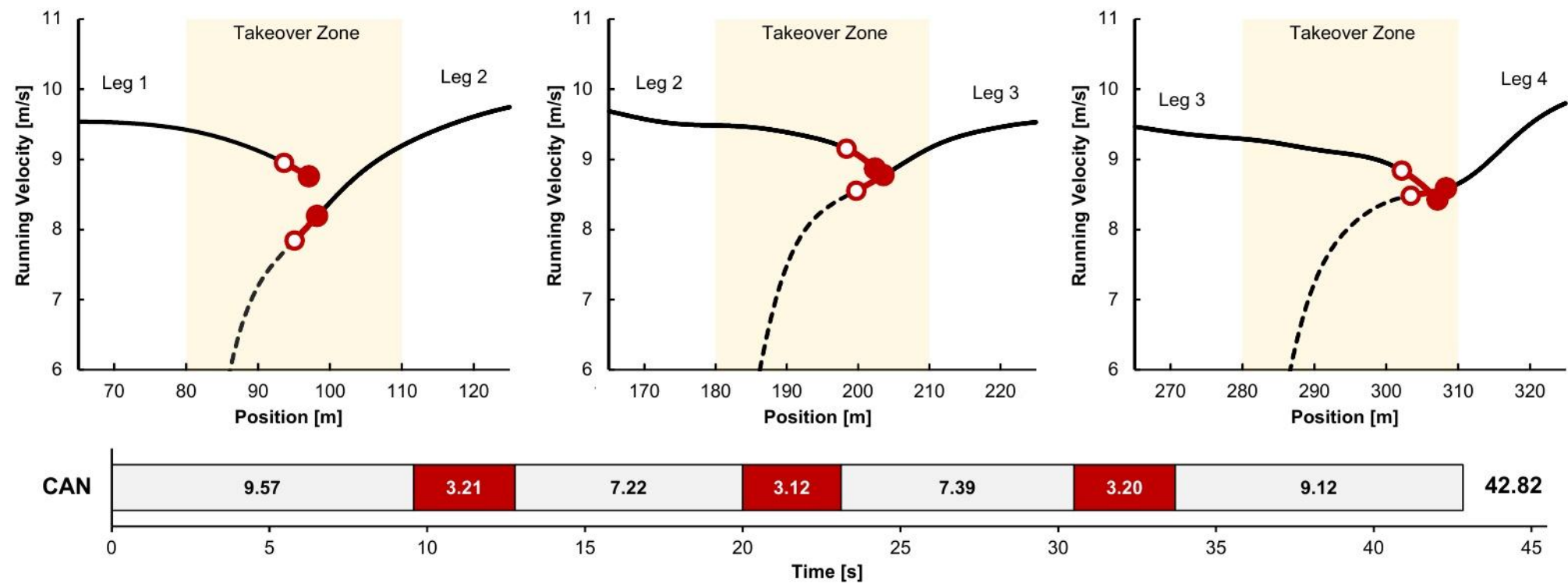


图 4-7。加拿大队在女子 4×100 米接力决赛中的跑动速度和接力棒交换表现。

表 3-7。加拿大队在女子 4×100 米接力决赛中的表现指标。

Baton Exchange	Velocity at Baton Exchange [m/s]		Bottom Velocity of Baton [m/s]	Baton Exchange Position [m]	Baton Exchange Duration [s]	Free Distance [m]
	Incoming Runner	Outgoing Runner				
Leg 1 to Leg 2	8.76	8.19	8.19	18.2	0.39	1.14
Leg 2 to Leg 3	8.87	8.78	8.78	23.6	0.45	1.21
Leg 3 to Leg 4	8.43	8.59	8.43	28.3	0.58	1.17

波兰

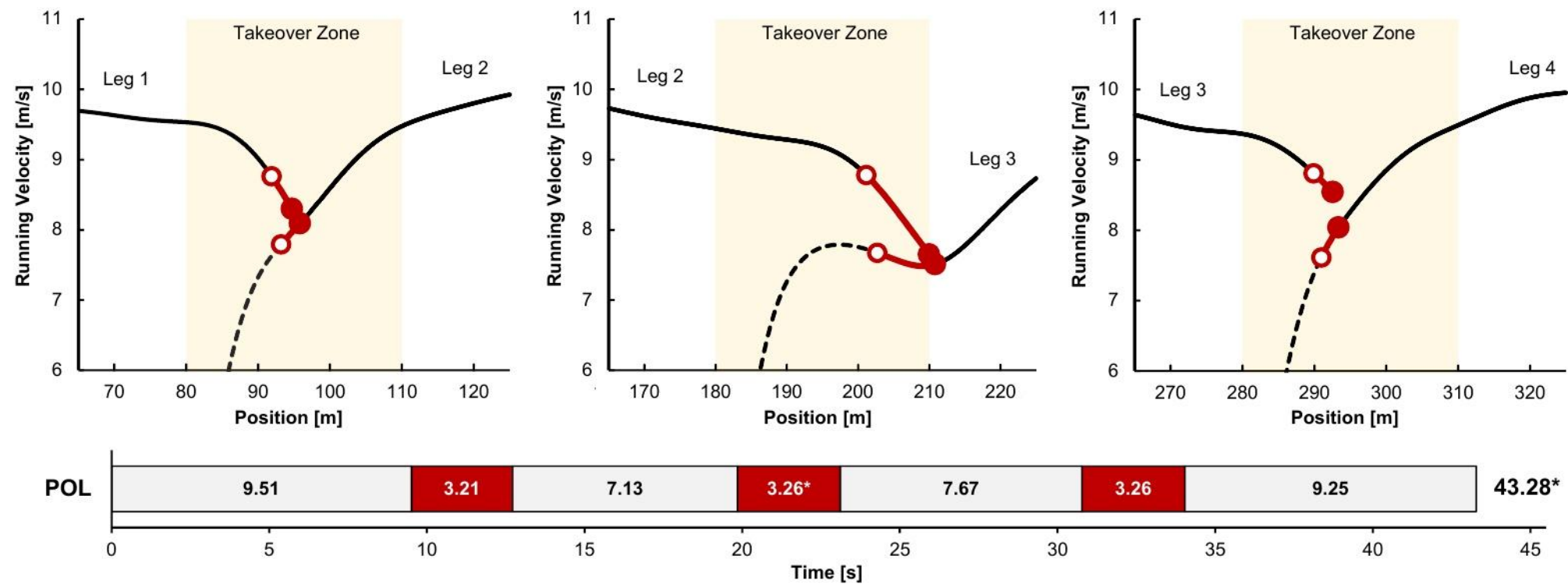


图 4-8。波兰队在女子 4×100 米接力决赛中的跑动速度和接力棒交换表现。注:*为分析数据得出的不合格接力棒交换成绩和不合格完赛时间。

表 3-8。波兰队在女子 4×100 米接力决赛中的表现指标。

Baton Exchange	Velocity at Baton Exchange [m/s]		Bottom Velocity of Baton [m/s]	Baton Exchange Position [m]	Baton Exchange Duration [s]	Free Distance [m]
	Incoming Runner	Outgoing Runner				
Leg 1 to Leg 2	8.30	8.09	8.09	15.8	0.33	1.10
Leg 2 to Leg 3	7.65	7.51	7.51	30.8 ^{DQ}	1.08	0.82
Leg 3 to Leg 4	8.54	8.04	8.04	13.4	0.31	0.80

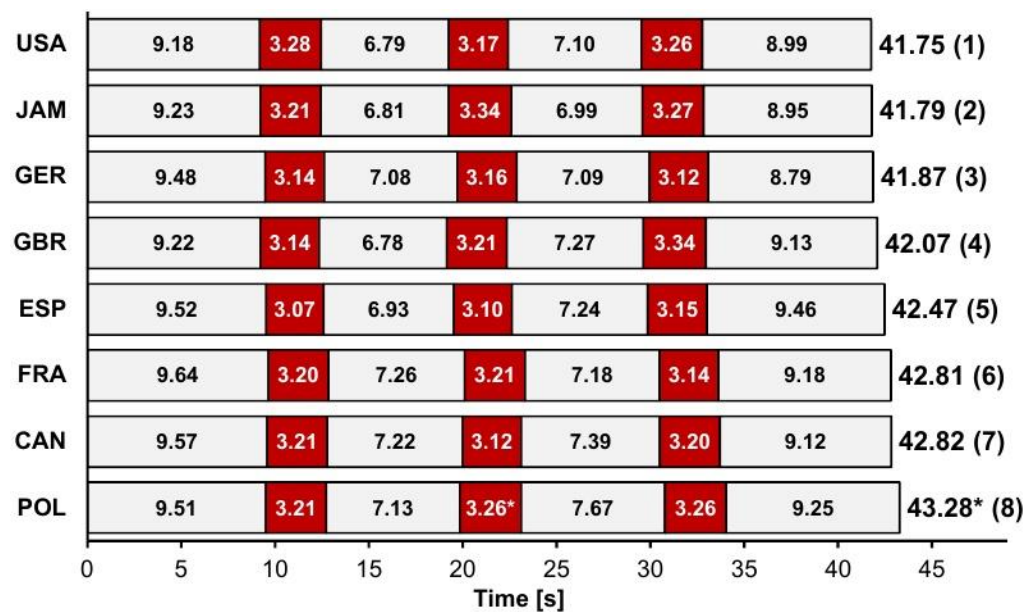


图 5.. 接棒区和个人接棒区时间分析参加女子 4×100 米接力决赛的队伍。
注:括号内的数字表示基于观察到的完成时间的力队排名。*表示根据分析数据得出的不合格接力棒交换和不合格完成时间。

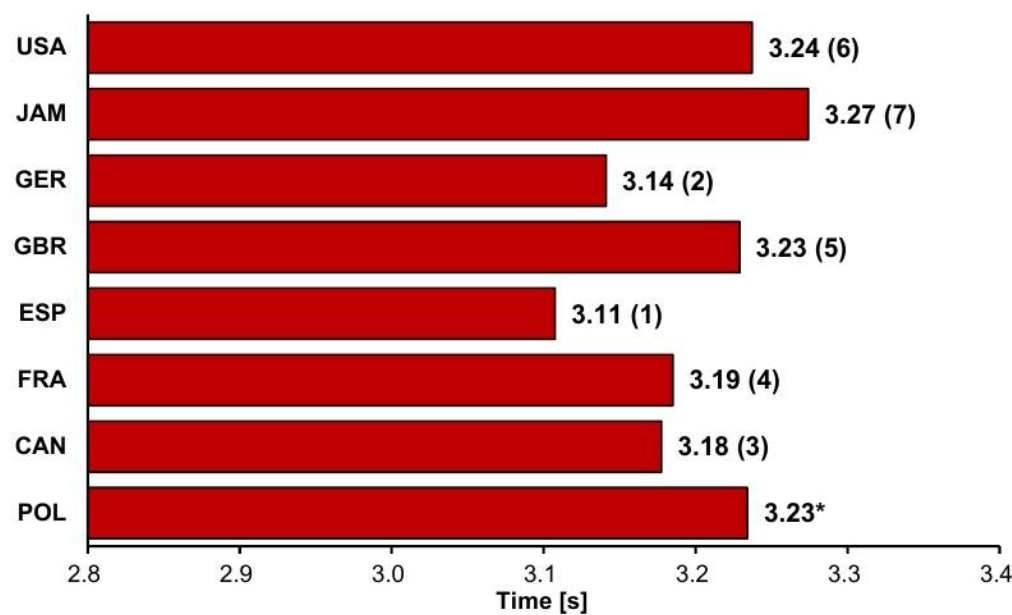


图 6.女子 4×100 米接力决赛中参赛队伍的平均接棒区时间。
注:*表示不合格的接力棒交换数据。括号内的数字表示基于平均接棒区次数的力队排名。

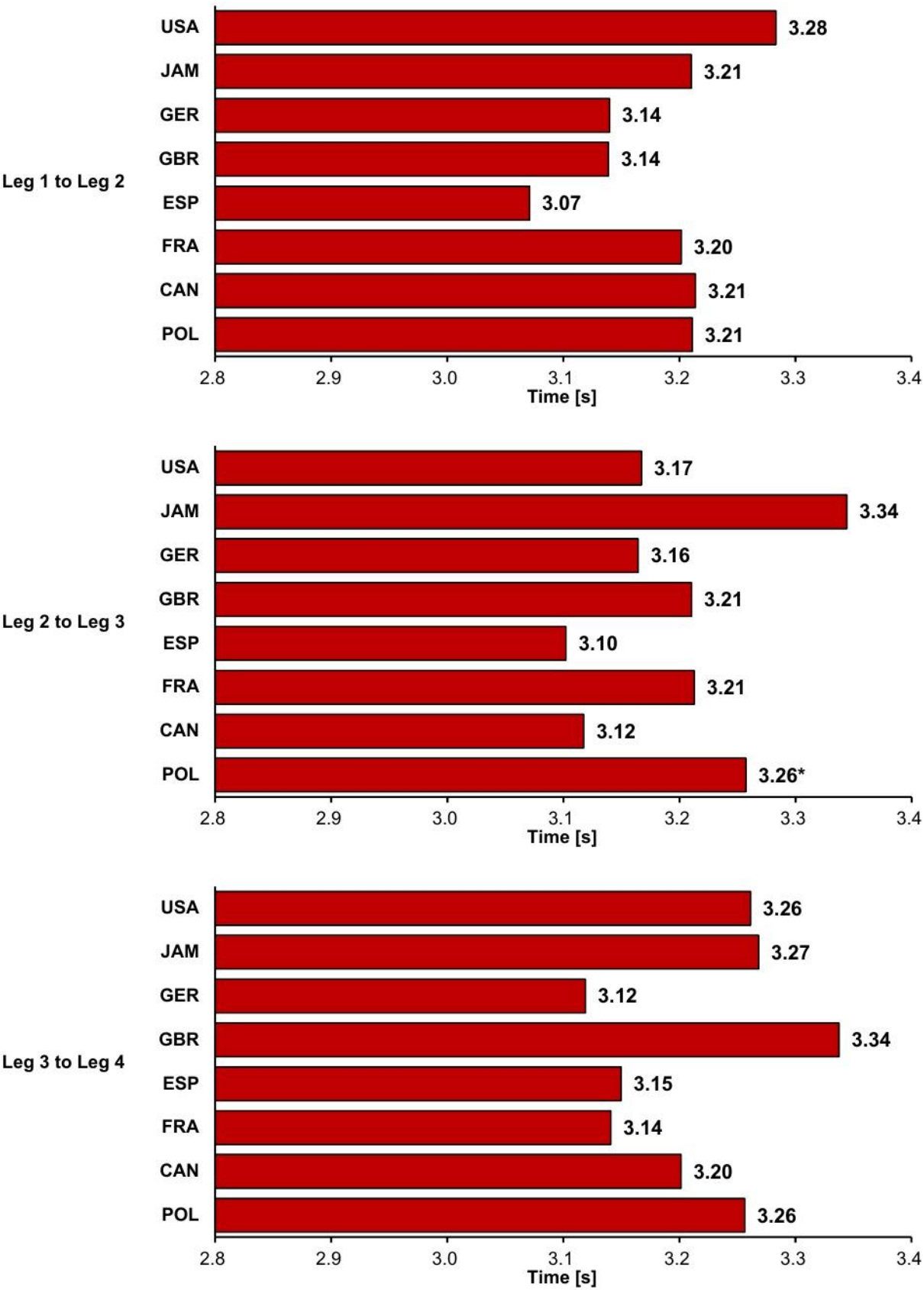


图 7。女子 4×100 米接力决赛中各队每次接力棒交换时的接力区时间。

注:*表示不合格的接力棒交换。

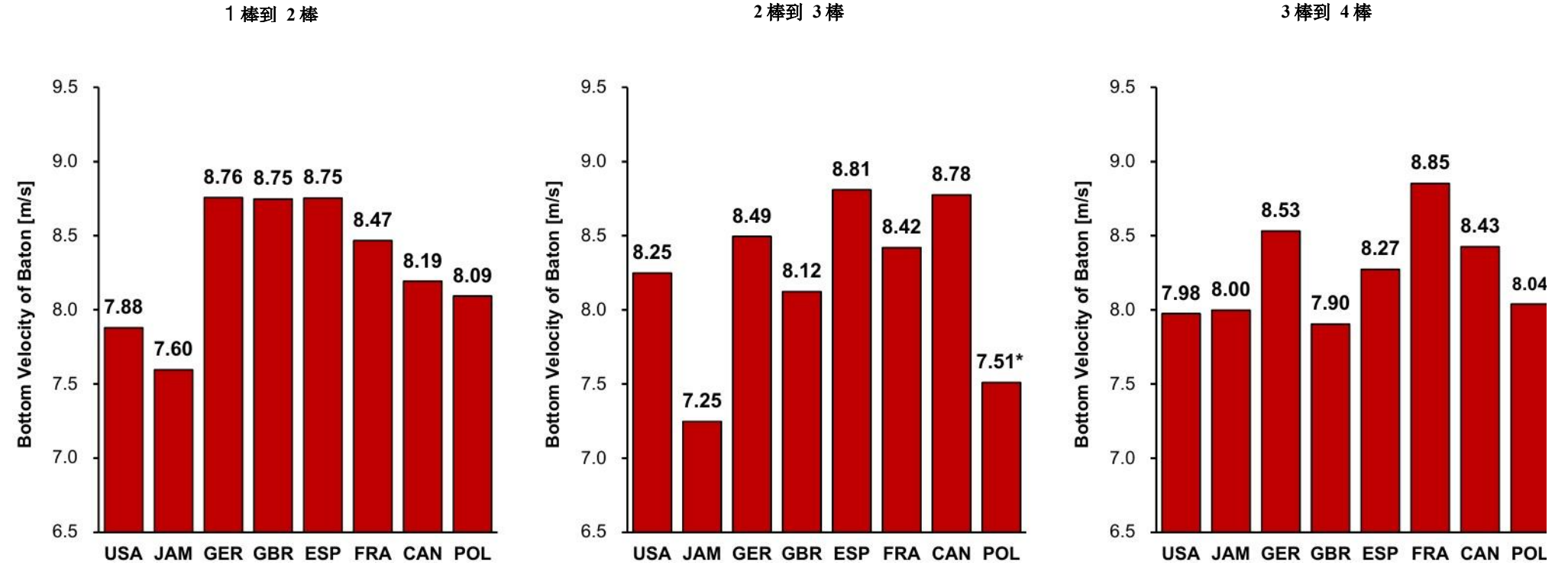


图 8。在女子 4×100 米接力决赛中，参赛队伍每次交换接力棒时，接力棒的最低速度。
注:*表示该数值来源于一次不合格的接力棒交换。

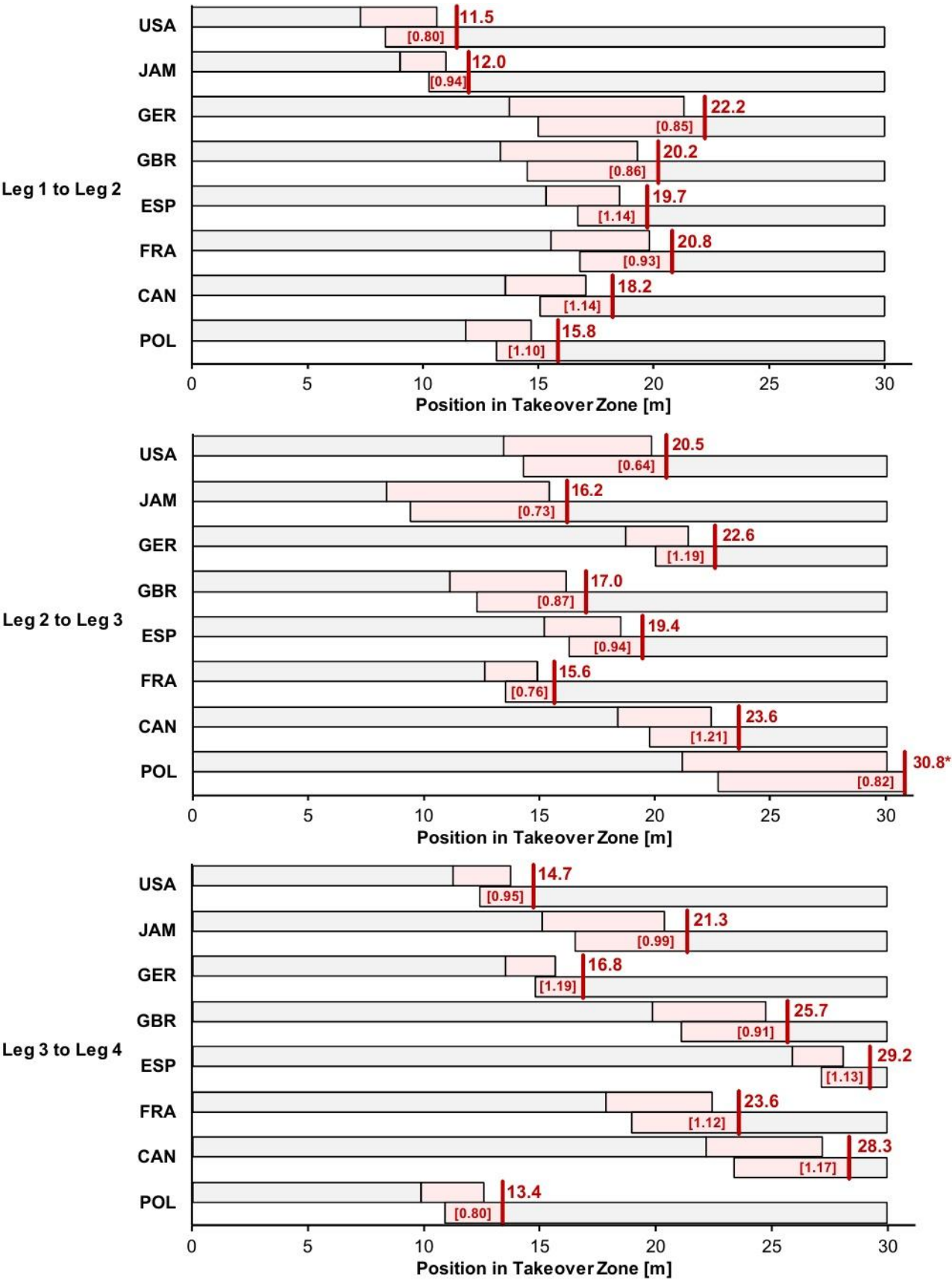


图 9. 女子 4×100 米接力决赛中各队每次接力棒交换时的交换位置和范围。
注:*表示不合格的接力棒交换。

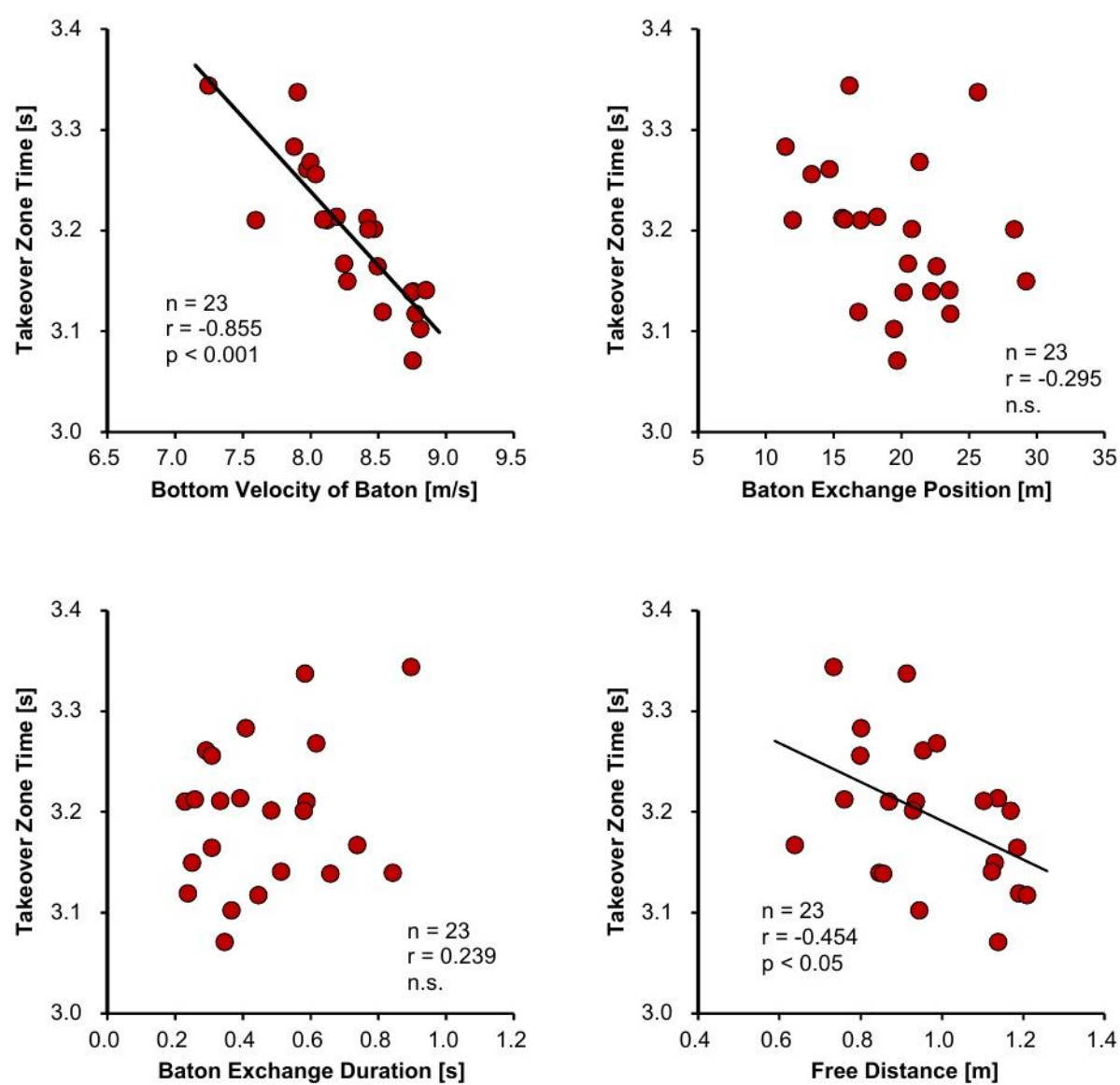


图 10。在女子 4×100 米接力决赛中参赛队伍的接棒区时间与相关表现指标之间的关系。

主要发现及启示

本项目分析了优秀女子 4×100 米接力队接力棒交换过程中接力棒输入和输出选手的跑速特征，揭示了接力棒交换表现的鲜明特征。基于接力赛完成时间的排名与基于团队成员平均 100 米赛季最佳记录的排名并不完全对应(表 2)，这表明接力棒交换表现可以有意义地影响比赛结果。

赢得比赛的美国队在被分析的队伍中，拥有排名第一的 100 米平均赛季最佳成绩。然而，他们的接棒区时间并不是最短的(图 6 和图 7)，这表明即使是获胜的接力队也可能还有提高接力棒交换效率的空间。

排名第二的牙买加队也有很高的个人冲刺能力。然而，他们在被分析的力队中表现出了最长的平均接棒区时间(图 6)。考虑到第一名接力队的优势很小，更有效的接力棒交换可能会提高他们赢得比赛的机会。

排名第三的德国队显示出第二短的平均接力区时间(图 6)，这表明接力棒的交换相对有效。他们的接力棒时间略短于第四名的英国，这可能是他们获得奖牌的原因，尽管他们的排名是基于个人冲刺能力的。

排名第五的西班牙队表现出了最短的平均接棒时间(图 6)。尽管在被分析的力队中，他们的平均 100 米赛季最佳成绩排名第八(表 2)，但他们的最终排名也有所提高。这表明个人短跑能力仍然是接力表现的重要决定因素。

统计分析显示，接力棒的最低速度与接力棒区域时间密切相关(图 10，左上)。如速度曲线所示，当前棒在通过接棒区时保持速度，当后棒在接到接力棒之前已经充分加速时，可以观察到较高的接力棒最低速度。这些条件与出跑者的起跑时间密切相关:一个适当的起跑时间可以让出跑者达到足够的速度，同时也减少了来跑者过度调整速度的需要。因此，后棒的起跑时机，配合前棒的进场，是有效接力棒交换的核心。

在本项目中，接力棒交换位置与接棒区时间无关(图 10，右上)。一般来说，在更靠近接力区终点的位置交换接力棒，可以让即将出线的跑者在接力棒前有更多的加速时间。然而，较晚的接力棒交换并不能自动保证高的跑者速度;长时间或延迟的接力棒交换可能会增加接棒区违规的风险，并降低出跑者的加速度。因此，交换策略应优先考虑保持接力棒速度，同时选择适当的接力棒交换位置，以允许足够的加速度而不会产生过大的风险。

大多数接力棒交换发生在接力棒区域内约 11-24 m 处，在 20 m 附近观察到最短的接力棒交换时间。这表明，当接力棒速度保持不变时，在接力棒区域的后期交换接力棒可能是有益的。虽然最合适的接力棒交换位置取决于每对跑者的相对冲刺能力和计时策略，但在 20 米附近的位置可能为精英女子接力队考虑接力棒交换策略提供一个实用的参考点。

从实用的角度来看，较长的接力棒交换持续时间可能会增加接力棒区域时间，因为长时间的交换会降低跑者的速度。然而，在接力棒交换持续时间和接棒区时间之间没有发现显著的相关性。在本项目中，大部分接力棒交换都在约 0.70 秒内完成，这表明这一持续时间可以作为优秀女子接力队的实用参考。

自由距离范围约为 0.6 ~ 1.3 米。这个变量很可能反映了运动员的身体尺寸，以及入跑者为了与出跑者保持适当的距离而调整速度的程度。在这个项目中，自由距离显示出与接棒区域时间的适度关联。虽然较大的自由距离理论上可能有利于减少接棒区时间，但这种关联比观测到的接力棒最低速度弱。因此，自由距离应被解释为次要因素，而不是指挥棒交换效率的主要决定因素。

总体而言，研究结果为优化接力棒交换表现提供了实用指导。接力棒交换应在传入和传出的跑者保持高速度的同时进行。在本项目分析的国际级比赛中，当接力棒交换发生在接力区 20 米左右时，通常会观察到更短的接力区时间。即将出发的跑者在与即将到来的跑者的接近协调起跑时间的同时，应在没有不必要犹豫的情况下加速。然而，追求更高的接力棒交换表现可能会增加接棒区违规的风险;因此，团队需要仔细地平衡潜在的表现收益和可接受的风险。

贡献者

日本国立体育科学中心(JISS)是日本体育科学的国家研究机构，在日本高表现体育中心(HPSC)为日本奥运会和残奥会运动员提供循证支持方面发挥着核心作用。五名 JISS 研究人员对该项目做出了贡献。

日本田联协会(JAAF)科学委员会在田径运动中推广科学方法。该委员会曾在 1991 年和 2007 年在日本举行的世界田径锦标赛上开展过生物力学项目。四名委员会成员为该项目做出了贡献。



CONTACT /本项目的首席研究员

Takeo Matsubayashi, phd . Research
Scientist
日本国立体育科学中心
takeo.matsubayashi@jpnsport.go.jp

参考文献

1) Ward-Smith A.J. and Radford P.F. A mathematical analysis of the 4×100 m relay. Journal of Sports Sciences 20: 369-381, 2002. <https://doi.org/10.1080/026404102317366627>

2) Radford P.F. and Ward-Smith A.J. The baton exchange during the 4×100 m relay: a mathematical analysis. Journal of Sports Sciences 21: 493-501, 2003.<https://doi.org/10.1080/0264041031000101836>

3) Japan Sport Council. Image processing apparatus, image processing system, image processing method, and program thereof (inventor: Matsubayashi T.). Japan Patent No. 7628739. registered Feb 3, 2025.

4) Matsubayashi T. and Ohnuma H. Calculation of mark coordinates in 400 m oval athletics tracks: for enhancing performance analysis. Journal of High Performance Sport 14: 1-22, 2025. https://www.jpnsport.go.jp/hpsc/Portals/z0/resources/jiss/info/doc/jhps/jhps14_1-22.pdf

5) MMPose Contributors. OpenMMLab Pose Estimation Toolbox and Benchmark. 2020.<https://github.com/open-mmlab/mmpose>

6) World Athletics. Track and field facilities manual 2019 Edition.<https://worldathletics.org/about-iaaf/documents/technical-information>

7) Cohen J., Cohen P., West S.G., and Aiken L.S. Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences. 3rd ed. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. 2003.