

血流限制训练的生理机制与应用进展

何 穗, 汪菊培, 吴 礼, 侯国政, 陈 琳, 徐国栋, 吴钰祥

江汉大学体育学院 (武汉 430056)



【摘要】血流限制训练作为一种安全有效的全新康复手段,可有效提高训练者的身体机能。相较于单纯抗阻训练,血流限制训练具有强度小、效果好和依从性高等优点,适合多数人群使用。血流限制训练的生理机制尚未完全阐明,目前存在四种主流假说,各有特点。本研究对血流限制训练的作用机制与应用进展进行综述,为其推广提供理论和实践依据。

【关键词】血流限制训练; 医疗康复; 肌肉适能

Physiological mechanism and application progress of blood flow restriction training

Sui HE, Ju-Pei WANG, Li WU, Guo-Zheng HOU, Lin CHEN, Guo-Dong XU, Yu-Xiang WU

Department of Health and Physical Education, Jianghan University, Wuhan 430056, China

Corresponding author: Yu-Xiang WU, Email: yxwu@jhun.edu.cn

【Abstract】As a new, safe and effective rehabilitation method, blood flow restriction training (BFRT) can improve the physical function of users. Compared with simple resistance training method, BFRT has advantages of low intensity, good efficacy and high compliance, so it is suitable for most people to use. The physiological mechanism of BFRT has not been fully elucidated, and there are four mainstream hypotheses, each with its own characteristics. We review the mechanism of action, application progress of BFRT, and provide a theoretical and practical basis for the promotion.

【Keywords】Blood flow restriction training; Medical rehabilitation; Muscle fitness

骨骼肌结构和功能是力量素质最重要的决定因素,普通人的肌肉质量在 30 岁后以每 10 年 3%~8% 的速率下降,因肌肉减少导致摔倒、致残或死亡的风险大大增加^[1]。传统抗阻训练可预防肌肉退化、增强肌肉力量,是规避上述风险的有效手段。美国运动医学会 (American College of Sports Medicine, ACSM) 的研究显示,使用传统抗阻训练增加肌肉质量及肌肉力量训练强度应在 6~12 RM (最大重复次数的重量, repetition maximum, RM) 为宜,训练负荷需达到

70%~85% 1 RM^[2]。但对医疗康复人群、老年人群或缺乏训练经验人群来说,难以有效达到较高的训练强度,且易增加运动损伤的风险。血流限制训练 (blood flow restriction training, BFRT) 又称加压训练,起源于日本^[3],其通过对肢体近心端实施外部加压,使训练者在运动期间的静脉血液回流受阻,并阻塞相关动脉血流,以增加运动效果^[4]。BFRT 既能达到高强度抗阻训练相似的效果,又能有效避免高强度抗阻训练的潜在风险,现已逐步应用于医疗康复、健身训练和竞技体育

DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202203002

基金项目: 国家自然科学基金项目 (82071970); 江汉大学科技创新专项基金 (2021kjzx008)

通信作者: 吴钰祥, 博士, 教授, 硕士研究生导师, Email: yxwu@jhun.edu.cn

等领域,为身体机能受损和无法承受高强度训练的人群提供了有效提高身体素质和加速康复的新方法。但 BFRT 的生理机制尚不明确,相关应用研究较少。本研究简要介绍 BFRT 的生理机制假说及其在医疗康复领域的应用,为其推广应用提供理论和实践依据。

1 血流限制训练的生理机制

BFRT 的生理机制假说主要涉及肌肉代谢产物累积刺激生长激素的释放、快缩型肌纤维激活的增强、肌肉内蛋白质合成路径的活化以及肌肉肿胀等四个方面。

1.1 肌肉代谢产物累积刺激生长激素的释放

BFRT 增加限制部位肌肉静脉血的汇集,减少动脉血回心,使肢体达到相对缺血、缺氧的状态。由于机体产生的代谢废物无法及时清除,局部代谢压力显著增加^[4-5]。BFRT 引起局部肌肉组织氧含量下降,部分回心受阻的血液和骨骼肌中乳酸含量升高,血流受限肌肉中的 II 组和 III 组代谢型谷氨酸受体受到刺激,进入下游神经纤维,调节交感神经以及化学感受器的反射协调作用,促进垂体前叶分泌生长激素 (growth hormone, GH)。GH 进一步促进肝脏器官分泌胰岛素样生长因子 1 (insulin-like growth factor-1, IGF-1), 同时 IGF-1 也可以刺激 GH 的分泌^[6], IGF-1 和 GH 的分泌可促进肌肉的增长^[7]。此外,机体在血流受限的部位呈现缺氧以及内环境 pH 值下降的情况,也可刺激肾上腺素、去甲肾上腺素和睾酮等激素的分泌,进而促进肌肉增长。研究发现 BFRT 引起的内环境改变可进一步增强一氧化氮合成酶 (nitric oxide synthase, NOS) 和热休克蛋白-72 (heat shock proteins, HSP-72) 分泌的信号通路,同时激活卫星细胞,对肌肉增长具有正向效应。此外, HSP-72 可缓解失用性肌萎缩导致的蛋白质合成效果下降,防止肌肉蛋白流失,减少细胞凋亡^[8]。

1.2 快缩型肌纤维激活的增强

McDonagh 和 Davies 的肌纤维募集定律指出,快缩型肌纤维激活阈值高于慢缩型肌纤维,训练中动用慢缩型肌纤维的运动负荷相对较低,而动用快缩型肌纤维的运动负荷则相对较高^[9]。传统训练认为,只有进行高强度抗阻运动,且运动负荷超过阈值时,才可确保快缩型肌纤维被募集,达到训练的效果。应用 BFRT 进行训练时,机体

局部肌肉的血流回心受阻后,加压部位氧含量下降导致内环境 pH 值随之下降,使得肌肉代谢受阻和人体感知疲劳度增加,刺激肌纤维激活的阈值较原先水平下降,即使低强度的抗阻训练,也可导致快缩型肌纤维较无加压状态下更易被激活^[10],快缩型肌纤维的募集大幅提高。

1.3 肌肉内蛋白质合成路径的活化

目前国内外鲜有 BFRT 对细胞内蛋白质合成分子机制调控的研究。研究显示, GH 和 IGF-1 均具有活化肌肉细胞中哺乳动物雷帕霉素靶蛋白 (mammalian target of rapamycin, mTOR) 信号通路的作用^[11]。mTOR 位于信号通路的中心位点,是细胞生长和增殖的重要调节因子, mTOR 信号是整个通路发挥作用表达的关键。BFRT 可激活 mTOR 信号通路,调节肌肉生长因子的合成与分泌^[12]。Fujia 等研究显示, BFRT 可导致血液中 GH 和 IGF-1 浓度显著增加,进一步活化 mTOR 信号通路,诱导血流受限的肌细胞内部核糖体蛋白 S6 激酶 (ribosomal protein S6 kinase β 1, S6K1) 的活性,并增强相应加压部位肌肉蛋白的合成^[13]。Fry 等使用压力为 200 mmHg (1 mmHg=0.133 kpa) 的 BFRT 进行探究,结果表明 BFRT 可一定程度激活单核吞噬细胞系统和 mTOR 信号通路^[12]。此外,将传统的低强度抗阻训练与部分肢体加压相结合,可能减弱泛素蛋白水解信号通路相关的重要分子 mRNA 的表达,从而减缓肌肉萎缩。

1.4 肌肉肿胀

BFRT 训练时,机体内环境累积大量代谢废物,增加了代谢压力,导致血液加速流进肌纤维内,促使肌细胞体积增大、肿胀,进而加速合成肌肉蛋白,同时抑制肌细胞内蛋白质水解。Loenneke 等研究显示,由于细胞存在水合作用,在运动过程中可能增强了细胞肿胀反应,或与 BFRT 表现的肌肉增大相关机制密切相关。虽已有研究发现 BFRT 运动后存在肌肉肿胀的现象^[13],但尚无可靠证据表明其通过降低蛋白质的水解促进肌肉生长。

2 血流限制训练的应用

近年来, BFRT 作为一种更加安全、高效和低风险的全新训练方式对膝关节炎症患者、专业运动员以及老年人的康复训练带来新的途径^[14]。

2.1 膝关节炎症患者

Giles 等将膝关节炎症患者分为 BFRT 组和标准化股四头肌强化组并进行为期 8 周的康复训练, 每周训练 3 次。其中 BFRT 组压力控制在 60% 肢体闭塞压以及 30% 1 RM 的训练强度, 训练量为 4 组 (30 次 +15 次 +15 次 +15 次) 的股四头肌强化训练^[14], 要求 BFRT 组组间间歇时间 30 s, 加压带全程处于加压状态, 4 组训练结束后压力移除; 标准化股四头肌强化组则利用未充气的加压带, 配合 70% 1 RM 的训练强度, 训练量为 3 组 (每组 7~10 次) 的传统股四头肌强化训练。结果显示, 与标准化股四头肌强化组相比, BFRT 训练可显著缓解患者日常活动时的膝关节疼痛, 且在增强股四头肌力量方面效果更佳^[15]。

2.2 专业运动员

运动员为达到对肌肉围度和力量的特殊要求, 力量训练是必要手段。ACSM 建议使用 70%~85% 1 RM 的重量进行训练, 有助于增加肌肉围度、增强肌肉力量^[16]。但对受伤运动员而言, 高强度训练可能延长康复周期, 甚至加剧病情, 而 BFRT 为受伤运动员提供了身体机能恢复的新途径。Loenneke 等为一名半月板撕裂和软骨骨折症状的二级健美运动员进行 BFRT 康复训练后发现, 其在肌肉力量的保持、骨软骨增生以及撕裂部位的修复方面均有明显改善^[17]。同样的, 针对类似跟腱撕裂等踝关节部位受伤的专业运动员, 在损伤部位尚未完全愈合及恢复的阶段, 不应急于开始原先的常规训练^[18], 医疗康复人员可通过 BFRT 与步行等较低强度有氧运动相结合的方式^[19], 改进运动员的康复计划, 保证康复过程中的安全, 避免疼痛的发生, 也能对运动员心肺功能起到恢复作用, 缩短康复后进行常规训练的周期^[20]。此外, BFRT 与传统抗阻训练相结合, 也可作为运动员常规训练的补充, 对发展运动员专项力量方面效果显著^[21]。现阶段来看, BFRT 可能提高运动员损伤后的康复效果, 但有待更多可靠的临床应用证据加以证明。

2.3 老年人群

老年人机体各部位肌肉力量出现不同程度的减弱, 随着控制肌肉神经的系统在结构和功能上加速衰退, 以及全身骨骼肌和肌纤维数量的减少, 大大增加了老年人群患肌少症的风险, 一系列骨骼肌相关功能的退化直接导致了老年人运动能力

的下降^[22]。因此, 针对老年人群的医疗康复方案更应注重负荷强度和运动量的把握。Ozaki 等研究发现, 老年人群在进行渐进方式的加压步行训练时, 伸肌和屈肌的前后肌力、大腿部位肌肉群的总质量、颈动脉顺应性功能分别增加了 8.7%、15.0%、3.0% 和 50.0%, 显示 BFRT 结合步行的训练方式, 在维护老年人群心血管功能方面有着良好效果^[24]。此外, 类似研究显示, 对患有包涵体肌炎的老年人群运用 BFRT 方式进行运动康复, 大腿肌肉的横截面积、最大肌肉力量以及身体移动能力分别提高了 4.7%、15.9% 和 60.0%, 同传统康复治疗相比更加有效, 患者自我感受也更轻松^[23], 与 Yasuda 等研究结果一致^[24]。将 BFRT 和其他运动相结合, 可增强老年人群的心血管功能, 如提高静脉顺应性的同时也降低了血管硬化的程度, 促进微血管生成, 降低运动后血压^[25]。此外, BFRT 还可增强阿尔茨海默病患者的日常自理和活动能力, 降低无脑回畸形导致颈部不稳定的风险以及帕金森病引起自理能力下降的风险, 还具有治疗股骨头缺血性坏死和内侧髌骨坏死、病态窦房结综合征和脑白质软化等的功效^[26]。Ozaki 等研究还发现进行 BFRT 后颈动脉的顺应性增加了约 50%^[27], 进一步说明了 BFRT 结合步行的训练方式能够有效增强老年人群的心血管功能^[28]。

综上, 针对不同人群设置的压力和训练强度等相关参数存在差异, 因此, 给受试者提供科学合理且个性化的运动处方才能使运动康复效果最大化, 以下总结了不同人群主要参数设置的相关范围以供参考, 由于尚无统一标准, 可以根据实际情况在对应参数基础上进行调整 (表 1)。

表1 不同人群应用血流限制训练的压力和运动负荷
Table 1. BFRT pressure and exercise load in different populations

项目	一般人群	中老年人群	运动员
上肢压力 (mmHg)	90~130	40~90	130~180
下肢压力 (mmHg)	130~160	60~130	160~220
训练负荷 (kg)	20%~40% 1 RM		
训练量 (次)	45~75 (3~4组)		
训练频率 (周)	2~4		
间歇时间 (s)	30~60		

3 血流限制训练的局限性

BFRT 作为一种新兴的训练方法,在增强肌肉适能方面受到体育健身、运动训练及医疗康复等相关领域的重视,但其生理机制尚未完全明确^[29],应用证据不够充分,存在一系列问题待深入研究。第一,多数 BFRT 的研究对象为普通人群和老年人群,极少涉及康复运动员,后续还需纳入其他特殊人群以探讨该训练法是否适用于更多人群。第二,需考虑性别、部位、压力值范围、训练方式、强度、频率等因素的影响,进一步规范 BFRT 运动处方的制订。第三,专业的 BFRT 加压装置较昂贵,常用于康复中心或高档健身房,应对训练装置进行简化,保留功能性,提高性价比,以便于推广普及。第四,训练安全性方面,虽大量的研究显示该方法无安全隐患,但是对于不同人群,应注意训练中的安全问题。

4 结语

同单纯的高强度抗阻训练相比, BFRT 具有安全性高、训练强度小、依从性好的优势,逐渐受到各类人群的青睐,该训练法能够广泛应用于康复训练、健身运动等领域并产生良好的训练效果。此外, BFRT 与其他训练相结合也能达到增强肌肉力量的作用。作为一种新兴的训练方法, BFRT 在使用时涉及较多参数,参数的设置与受试者安全和训练效果直接相关,在训练期间还需专业人士进行实时监督和指导。因此,未来需进一步完善和制定标准化的 BFRT 主要参数、拓展 BFRT 研究对象、规范训练处方等,深入开展基础研究,降低训练成本,并逐渐向社会大众推广,助力实现全民健身和“健康中国 2030”目标。

参考文献

- Cruz-Jentoft AJ, Baeyens JP, Bauer JM, et al. Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: report of the European working group on sarcopenia in older people[J]. *Age Ageing*, 2010, 39(4): 412–423. DOI: [10.1093/ageing/afq034](https://doi.org/10.1093/ageing/afq034).
- Garber CE, Blissmer B, Deschenes MR, et al. American college of sports medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2011, 43(7): 1334–1359. DOI: [10.1249/MSS.0b013e318213fefb](https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318213fefb).
- 魏佳, 李博, 杨威, 等. 血流限制训练的应用效果与作用机制[J]. *体育科学*, 2019, 39(4): 71–80. [Wei J, Li B, Yang W, et al. Application effect and mechanism of blood flow restriction training[J]. *China Sport Science*, 2019, 39(4): 71–80.] DOI: [10.16469/j.css.201904008](https://doi.org/10.16469/j.css.201904008).
- Kim J, Lang JA, Paliana N, et al. Effects of blood flow restricted exercise training on muscular strength and blood flow in older adults[J]. *Exp Gerontol*, 2017, 99: 127–132. DOI: [10.1016/j.exger.2017.09.016](https://doi.org/10.1016/j.exger.2017.09.016).
- Yasuda T, Fukumura K, Fukuda T, et al. Effects of low-intensity, elastic band resistance exercise combined with blood flow restriction on muscle activation[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2014, 24(1): 55–61. DOI: [10.1111/j.1600-0838.2012.01489.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01489.x).
- Teixeira EL, Barroso R, Silva-Batista C, et al. Blood flow restriction increases metabolic stress but decreases muscle activation during high-load resistance exercise[J]. *Muscle Nerve*, 2018, 57(1): 107–111. DOI: [10.1002/mus.25616](https://doi.org/10.1002/mus.25616).
- Jessee MB, Mouser JG, Buckner SL, et al. Effects of load on the acute response of muscles proximal and distal to blood flow restriction[J]. *J Physiol Sci*, 2018, 68(6): 769–779. DOI: [10.1007/s12576-018-0593-9](https://doi.org/10.1007/s12576-018-0593-9).
- Gundermann DM, Walker DK, Reidy PT, et al. Activation of mTORC1 signaling and protein synthesis in human muscle following blood flow restriction exercise is inhibited by rapamycin[J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2014, 306(10): E1198–E1204. DOI: [10.1152/ajpendo.00600.2013](https://doi.org/10.1152/ajpendo.00600.2013).
- McDonagh MJ, Davies CT. Adaptive response of mammalian skeletal muscle to exercise with high loads[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1984, 52(2): 139–155. DOI: [10.1007/BF00433384](https://doi.org/10.1007/BF00433384).
- Yasuda T, Abe T, Sato Y, et al. Muscle fiber cross-sectional area is increased after two weeks of twice daily KAATSU-resistance training[J]. *International Journal of Kaatsu Training Research*, 2005, 1(2): 65–70. DOI: [10.3806/ijktr.1.65](https://doi.org/10.3806/ijktr.1.65).
- Hayashi AA, Proud CG. The rapid activation of protein synthesis by growth hormone requires signaling through

- mTOR[J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2007, 292(6): E1647–E1655. DOI: [10.1152/ajpendo.00674.2006](https://doi.org/10.1152/ajpendo.00674.2006).
- 12 Fry CS, Glynn EL, Drummond MJ, et al. Blood flow restriction exercise stimulates mTORC1 signaling and muscle protein synthesis in older men[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2010, 108(5): 1199–1209. DOI: [10.1152/japplphysiol.01266.2009](https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01266.2009).
- 13 Fujita S, Abe T, Drummond MJ, et al. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2007, 103(3): 903–910. DOI: [10.1152/japplphysiol.00195.2007](https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00195.2007).
- 14 Giles L, Webster KE, McClelland J, et al. Quadriceps strengthening with and without blood flow restriction in the treatment of patellofemoral pain: a double-blind randomised trial[J]. *Br J Sports Med*, 2017, 51(23): 1688–1694. DOI: [10.1136/bjsports-2016-096329](https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096329).
- 15 Scott BR, Loenneke JP, Slattery KM, et al. Exercise with blood flow restriction: an updated evidence-based approach for enhanced muscular development[J]. *Sports Med*, 2015, 45(3): 313–325. DOI: [10.1007/s40279-014-0288-1](https://doi.org/10.1007/s40279-014-0288-1).
- 16 Laurentino GC, Ugrinowitsch C, Roschel H, et al. Strength training with blood flow restriction diminishes myostatin gene expression[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(3): 406–412. DOI: [10.1249/MSS.0b013e318233b4bc](https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318233b4bc).
- 17 Loenneke JP, Fahs CA, Rossow LM, et al. Blood flow restriction pressure recommendations: a tale of two cuffs[J]. *Front Physiol*, 2013, 4: 249. DOI: [10.3389/fphys.2013.00249](https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00249).
- 18 Ozaki H, Yasuda T, Ogasawara R, et al. Effects of high-intensity and blood flow-restricted low-intensity resistance training on carotid arterial compliance: role of blood pressure during training sessions[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2013, 113(1): 167–174. DOI: [10.1007/s00421-012-2422-9](https://doi.org/10.1007/s00421-012-2422-9).
- 19 Wilson JM, Lowery RP, Joy JM, et al. Practical blood flow restriction training increases acute determinants of hypertrophy without increasing indices of muscle damage[J]. *J Strength Cond Res*, 2013, 27(11): 3068–3075. DOI: [10.1519/JSC.0b013e31828a1ffa](https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31828a1ffa).
- 20 李新通, 潘玮敏, 覃华生, 等. 血流限制训练: 加速肌肉骨骼康复的新方法 [J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(15): 2415–2420. [Li XT, Pan WM, Qin HS, et al. Blood flow restriction training: a novel approach for accelerating musculoskeletal rehabilitation[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2019, 23(15): 2415–2420.] DOI: [10.3969/j.issn.2095-4344.1142](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.1142).
- 21 Faltus J, Owens J, Hedt C. Theoretical applications of blood flow restriction training in managing chronic ankle instability in the basketball athlete[J]. *Int J Sports Phys Ther*, 2018, 13(3): 552–560. DOI: [10.1249/MSS.0b013e318233b4bc](https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318233b4bc).
- 22 赵静, 尹练, 雷雪梅, 等. 加压训练对中老年人肌肉适能的影响与优势 [J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(23): 3737–3743. [Zhao J, Yin L, Lei XM, et al. KAASTU training for muscle fitness in the middle-aged and elderly adults: effects and strengths[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2020, 24(23): 3737–3743.] DOI: [10.3969/j.issn.2095-4344.2690](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.2690).
- 23 Renzi CP, Tanaka H, Sugawara J. Effects of leg blood flow restriction during walking on cardiovascular function[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2010, 42(4): 726–732. DOI: [10.1249/MSS.0b013e3181bdb454](https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181bdb454).
- 24 Yasuda T, Ogasawara R, Sakamaki M, et al. Combined effects of low-intensity blood flow restriction training and high-intensity resistance training on muscle strength and size[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2011, 111(10): 2525–2533. DOI: [10.1007/s00421-011-1873-8](https://doi.org/10.1007/s00421-011-1873-8).
- 25 Lowery RP, Joy JM, Loenneke JP, et al. Practical blood flow restriction training increases muscle hypertrophy during a periodized resistance training programme[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2014, 34(4): 317–321. DOI: [10.1111/cpf.12099](https://doi.org/10.1111/cpf.12099).
- 26 Stewart IB, Moghadam P, Borg DN, et al. Thermal infrared imaging can differentiate skin temperature changes associated with intense single leg exercise, but not with delayed onset of muscle soreness[J]. *J Sports Sci Med*, 2020, 19(3): 469–477. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4344.2690](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.2690).
- 27 Ozaki H, Yasuda T, Ogasawara R, et al. Effects of high-intensity and blood flow-restricted low-intensity resistance training on carotid arterial compliance: role of blood pressure during training sessions[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2013, 113(1): 167–174. DOI: [10.1007/s00421-012-2422-9](https://doi.org/10.1007/s00421-012-2422-9).

- 28 de Freitas MC, Gerosa-Neto J, Zanchi NE, et al. Role of metabolic stress for enhancing muscle adaptations: practical applications[J]. World J Methodol, 2017, 7(2): 46-54. DOI: [10.5662/wjm.v7.i2.46](https://doi.org/10.5662/wjm.v7.i2.46).
- 29 徐飞, 王健. 加压力量训练: 释义及应用 [J]. 体育科学, 2013, 33(12): 71-80. [Xu F, Wang J. KAATSU

training: interpretation and applications[J]. China Sport Science, 2013, 33(12): 71-80.] DOI: [10.3969/j.issn.1000-677X.2013.12.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-677X.2013.12.014).

收稿日期: 2022 年 03 月 01 日 修回日期: 2022 年 04 月 15 日
本文编辑: 桂裕亮 黄 笛