

健美操运动员单次跳跃与连续跳跃能力的生物力学分析

吴升扣, 纪仲秋

(北京师范大学 体育与运动学院, 北京 100875)

摘 要: 采用 QUALYSIS 系统、KISTLER 系统, 对 26 名竞技健美操一级运动员单次屈体分腿跳、连续两次屈体分腿跳动作进行运动生物力学分析。结果发现, 男运动员能够较好地完成连续的屈体分腿跳, 但是连跳中第 2 次跳跃在腾空时间、腾空高度、腾空时髋关节角度和垂直起跳冲量指标上都与单次屈体分腿跳差异存在显著性意义, 不如单次屈体分腿跳表现得优异; 女运动员完成连续的屈体分腿跳较差, 连跳中第 2 次跳跃除了起跳缓冲时间与单个屈体分腿跳差异无显著意义外, 其他指标差异均有显著意义。因此建议女运动员尽量规避两个 C 组难度动作的动作连接。另外, 男女运动员在 3 个跳跃中的腾空时间、腾空高度、髋关节角度、垂直起跳冲量上差异均有非常显著意义, 男运动员的跳跃效果明显优于女运动员; 而在缓冲时间、蹬伸时间、起跳时间、腾空时膝关节角度上差异没有显著性意义。

关 键 词: 运动生物力学; 竞技健美操; 单次跳跃; 连续跳跃

中图分类号: G804.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2014)03-0132-05

A sports biomechanical analysis of the single jumping and successive jumping ability of aerobic gymnasts

WU Sheng-kou, JI Zhong-qiu

(School of Physical Education and Sports, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: By using the QUALYSIS and KISLER systems, the authors carried out a sports biomechanical analysis on the single body bent and leg split jumping and successive two times body bent and leg split jumping moves made by 26 class one aerobic gymnasts, and revealed the following findings: the male gymnasts could complete successive body bent and leg split jumping well, however, the second jumping in successive jumping was significantly different from single body bent and leg split jumping in terms of such indexes as flying time, flying height, hip joint angle during flying and vertical takeoff momentum, not as good as what were performed in single body bent and leg split jumping; the female gymnasts had a relatively poor performance in completing successive body bent and leg split jumping, except the takeoff buffer time, which showed no significant difference, all the other indexes showed a significant difference between the second jumping in successive jumping and single body bent and leg split jumping. Therefore, the authors suggested that female gymnasts avoid the combination of two group C difficulty moves whenever possible. In addition, the male and female gymnasts showed very significant differences in the 3 jumps in terms of flying time, flying height, hip joint angle, vertical takeoff momentum, the jumping effect of the male gymnasts was significantly better than the female gymnasts', yet there were no significant differences in terms of buffer time, stretching time, takeoff time, and knee joint angle during flying.

Key words: sports biomechanics; competitive aerobics; single jumping; successive jumping

在竞技健美操中, 跳与跃类难度动作(C 组难度)在 4 组难度动作中数量最多, 且是成套动作中必须出现的一组难度动作, 因此, 竞技健美操运动员必须具

备高水平的弹跳能力。随着竞技健美操技术的迅速发展, 对运动员的弹跳能力提出了更高的要求。《2012—2016 年竞技健美操最新规则》规定: 成套 10 个难

度中的两个难度,可以从A组和C组中不同根命组的难度动作任意选择,直接进行连接^[1]。两个C组动作的连接,第1个动作落地时,落地腿作为第2个动作的起跳腿,必须马上开始第2个动作。这样的跳跃难度连接不仅可以获得额外的加分,还能增加成套动作的艺术分以及裁判对运动员的印象分。连续完成跳跃难度是对运动员的挑战,且竞技健美操不仅仅要求弹跳高度,还对起跳速度和空中姿态提出了要求^[2],因此研究运动员的跳跃能力特别是连续跳跃能力是非常必要的。本研究采用QUALYSIS红外高速测试系统^[3]和KISTLER三维测试系统^[4]测试了竞技健美操运动中典型的跳跃难度动作——屈体分腿跳,从运动学和动力学的角度深入分析竞技健美操运动员的单次跳跃和连续跳跃能力,为竞技健美操弹跳力训练提供依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究以26名健美操一级运动员为研究对象,女15人,男11人,受试者身体健康,没有下肢运动伤病,并签署知情同意书。

1.2 研究方法

1)测试方案。

每名运动员都进行2项测试,分别为单个屈体分腿跳和连续2次屈体分腿跳,具体操作为:(1)单个跳跃:经过简单的热身,受试者先于测力台外做一次开合步伐,再上步于测力台上完成单个屈体分腿跳。腾空时双手前平举,要求受试者尽量跳高,快速踢腿,尽量让双腿能达到水平的角度,落地时着落在测力台上。(2)连续跳跃:经过简单的热身,受试者先于测力台外做一次开合步伐,再上步于测力台上完成2个连

续的屈体分腿跳,要求受试者尽量跳高,快速踢腿,尽量让双腿能达到水平的角度;两次跳跃必须连贯,不能有中断,且都在测力台上完成。

2)测试器材。

KISTLER三维测力台,采用频率为1000 Hz,采集时间为15 s;QUALYSIS红外高速运动捕捉测试系统,采用频率为500 Hz,采集时间为15 s。

3)测试指标。

采集跳跃全过程的力-时间曲线,起跳时间、缓冲阶段时间、蹬伸阶段时间,起跳阶段力的冲量,每次腾空最高点时膝、髋关节角度、各环节加速度等数据。

4)统计方法。

用SPSS18.0对各项指标参数进行统计分析,对运动员单独跳跃、连续跳跃中第1次跳跃和第2次跳跃的指标进行单因素ANOVA分析,比较运动员在3个跳跃中的差异;再对3个跳跃的指标进行男女组间独立样本T检验,比较不同性别运动员之间的差异。以 $P<0.05$ 表示差异具有显著性意义, $P<0.01$ 表示差异具有非常显著性意义。

2 结果与讨论

屈体分腿跳需要运动员优秀的弹跳能力。不仅腾空要高,起跳速度也要快^[5]。本研究采集了单个屈体分腿跳、连续两次屈体分腿跳中的第1次跳跃和第2次跳跃的起跳和腾空阶段运动学与动力学数据。

2.1 单次跳跃与连续跳跃能力运动学测试结果

运动学指标是通过QUALYSIS摄像系统采集的包括各个特征画面的各关节的角度、运动速度、高度以及时间等指标,测试结果如表1所示。

表1 不同跳跃中运动员运动学参数测定结果($\bar{x} \pm s$)

性别	n/人	跳跃类型	髋关节腾空高度/m	腾空时间/s	缓冲时间/s	蹬伸时间/s	起跳时间/s	腾空髋关节角度/(°)	腾空膝关节角度/(°)
男	11	单次跳跃起跳	0.58±0.05	0.69±0.02	0.18±0.03	0.18±0.03	0.35±0.06	62.98±8.74	167.50±3.73
		连跳第1次起跳	0.56±0.05 ⁴⁾	0.63±0.03	0.20±0.04	0.17±0.03	0.37±0.01	73.89±9.79 ³⁾	168.66±2.30
		连跳第2次起跳	0.48±0.03 ⁴⁾⁶⁾	0.62±0.02 ³⁾	0.17±0.04	0.18±0.04	0.35±0.08	71.98±9.52 ³⁾	167.79±2.10
女	15	单次跳跃起跳	0.37±0.08 ²⁾	0.54±0.04 ²⁾	0.16±0.05	0.15±0.04	0.32±0.07	95.92±9.55 ²⁾	165.45±5.81
		连跳第1次起跳	0.35±0.08 ²⁾	0.52±0.05 ²⁾	0.17±0.04	0.16±0.03	0.32±0.06	98.21±9.10 ²⁾	166.04±4.25
		连跳第2次起跳	0.31±0.06 ³⁾²⁾	0.51±0.05 ³⁾¹⁾	0.17±0.04	0.22±0.05 ⁴⁾⁶⁾	0.38±0.01	101.85±10.51 ³⁾²⁾	166.39±6.16

1)与男性比较, $P<0.05$; 2)与男性比较, $P<0.01$; 3)与同组单跳比较, $P<0.05$; 4)与同组单跳比较, $P<0.01$; 5)与同组连跳第1跳比较, $P<0.05$; 6)与同组连跳第1跳比较, $P<0.01$

1)髋关节的腾空净高度变化。
竞技健美操规则规定屈体分腿跳最低完成标准为

双腿达到水平位置,髋关节的腾空高度直接反映了竞技运动员的弹跳效果^[6],因此本研究腾空高度采用的是

髌关节的腾空净高度。髌关节的腾空净高度是用运动员腾空最高点时髌关节的高度减去运动员着板缓冲瞬间髌关节的高度得出的。

从表 1 可看出,男运动员单个跳跃时的髌关节腾空净高度最高,其次是连续跳跃中的第 1 次腾空高度,最低的是连续跳跃中的第 2 次腾空高度,女运动员也表现出了相同的趋势。且男女运动员单独跳跃的腾空高度与连跳中第 2 次的腾空高度之间差异存在显著性。因为连续跳跃时运动员需要从较高的空中落下,然后迅速完成第 2 次起跳,需要下肢伸肌群强大的超等长收缩能力,对运动员的跳跃能力提出了很高的要求。通过独立样本 *T* 检验发现,男女运动员腾空高度的组间对比差异具有非常显著性,说明男运动员弹跳高度要明显优于女运动员。

2) 腾空时间的变化。

男女运动员单个跳跃的腾空时间、连续两次跳跃中第 1 次腾空时间和第 2 次腾空时间呈现出递减的现象。对比运动员的 3 个腾空时间发现,单个跳跃的腾空时长与连跳中第 2 次腾空时长差异存在显著性。比较男女在 3 个腾空时长时发现,无论完成哪种跳跃,男运动员的腾空时间都明显优于女运动,这与 QUALYSIS 系统测试的腾空髌关节高度的结果是吻合的。

3) 起跳缓冲时间的变化。

缓冲阶段是指从运动员着板时刻到膝关节角度达到最小时刻的过程。起跳腿的屈膝缓冲是非常必要的,因为它使起跳腿的伸肌群做退让性收缩,提高了肌肉与肌腱的弹性势能,使肌肉的总收缩力增大,但如果想取得良好的起跳效果,膝关节就不能过度的屈曲。缓冲角度偏大会导致缓冲时间过长,不利于肌肉弹性势能的利用,甚至会造成肌肉的松弛。另外竞技健美操属于表现难美类项目,不仅要考虑到弹跳高度,还要考虑视觉效果。如果缓冲时间太长,会造成动作拖沓,跟不上音乐节奏,导致动作与音乐脱节。

表 1 对运动员完成单次和连续跳跃时起跳缓冲时间指标进行了单因素 ANOVA 分析以及独立样本 *T* 检验,结果说明男女运动员 3 个起跳的缓冲时间无论在组内还是在组间差异都没有显著性,即表明男女运动员起跳的缓冲时长相近。从绝对值来看,女运动员的缓冲时间普遍比男运动员缓冲时间短。以往的研究表明,当缓冲时起跳腿膝关节角度低于 130° 时,肌肉的弹性就会下降 $10\% \sim 20\%$ ^[7-9]。女运动员由于下肢伸肌群离心力量没有男运动员强,因此缓冲时间稍短。如果缓冲时间过长的话,会使膝关节缓冲角度过大,从而影响缓冲与蹬伸阶段的有效转化,丧失已积聚的弹性势能,女运动员的弹跳效果将会受更大的影响。

4) 起跳蹬伸时间的变化。

蹬伸阶段是指从膝关节由最小时刻开始到运动员离板时刻的过程。蹬伸阶段是运动员能够跳起的直接能量来源,决定着跳跃的高度。另外在竞技健美操中,迅速的蹬伸和迅速的缓冲一样,是弹跳能力强的重要表现,会给裁判以视觉的冲击。

运动员起跳蹬伸时间指标的变化情况比缓冲时间指标的变化要复杂很多。男运动员单个跳跃和连跳中第 1 次起跳的蹬伸时间相差无几,而连跳中第 2 次起跳时间较前两个起跳有所增加;女运动员起跳蹬伸时间出现了类似的情况。单个跳跃、连跳第 1 次起跳蹬伸时间很接近,分别为 0.15、0.16 s,连跳第 2 次起跳蹬伸时间增加为 0.22 s,甚至超过了男运动员,与前两个起跳蹬伸时间差异出现了非常显著性($P < 0.01$)。由于男运动员第 2 次跳跃高度并没有变化,而女运动员第 2 次跳跃高度出现了明显下降,因此我们认为连跳中的第 2 次起跳对女运动员来说非常具有挑战性。

连续跳跃时人体从高空落下后,紧接着起跳蹬伸,下肢伸肌群先被动拉长然后再进行主动的向心收缩,是非常典型的超等长收缩,需要运动员很强的超等长收缩能力。研究发现女运动员的超等长收缩能力要远远差于男运动员^[10-11]。

对男女运动起跳蹬伸时间进行组间对比发现,在单个跳跃以及连跳中的第 1 个跳跃中,女运动员比男运动员起跳蹬伸时间短很多,连跳中第 2 次跳跃女运动员的蹬伸时间与男运动员没有显著差异。结合男女运动员弹跳高度的表现,本研究认为蹬伸时间是影响女运动员弹跳效果的重要原因,蹬伸的力量与时间的乘积,决定了运动员起跳的速度。一般情况下,女运动员下肢蹬伸力量要小于男运动员,蹬伸时间再短的话,力量与时间的乘积自然就小了。虽然女运动员的体重(56.78 ± 6.93)kg 比男运动员体重(64.31 ± 6.45)kg 小,也可能产生较大的蹬伸速度。但结合垂直起跳冲量来看,男运动员的垂直起跳冲量比女运动员大得多,所以女运动员的离板速度还是比男运动员慢,弹跳高度自然就比男运动员低。

5) 起跳时间的变化。

起跳时间是指运动员从着板瞬间至离板瞬间,它是由起跳缓冲时间与蹬伸时间相加得来的。运动员起跳太仓促,会影响弹性势能的储备;但起跳时间过长,会造成肌肉松弛,弹跳效果同样不会理想。被拉长的肌肉,其张力有随着时间的延长而下降的特性,这一特性称肌肉松弛。这是肌肉中串联及并联弹性元属黏弹性体的特性所决定的^[12]。

单因素 ANOVA 分析发现,男生单个跳跃与连跳

的起跳时间没有显著性的差异。而女运动员连跳第2次起跳时间比第1次起跳,以及单个跳跃的起跳时间都显著增加,导致这种现象的原因是女运动员第2次蹬伸时间的延长。在连跳中由于第2次跳跃是运动员由高处落下后紧接着起跳,中间没有任何的间歇,比单个跳跃困难许多,需要运动员下肢强大的超等长收缩能力。男运动员在进行缓冲后能接着募集腿部伸肌群肌纤维迅速收缩,而女运动员这种迅速转化的能力就差很多,因此第2次起跳时间变长。对比男女运动员发现,男女生在不同跳跃动作中起跳的时间不存在显著性差异,即从外表上看,男女运动员的起跳时间是差不多的。结合腾空高度,我们总结在相同的起跳时间内,男运动员能获得更好的腾空高度,且男运动员的起跳并没有给人缓慢、沉重的感觉。

6) 腾空最高点髌、膝关节的角度变化。

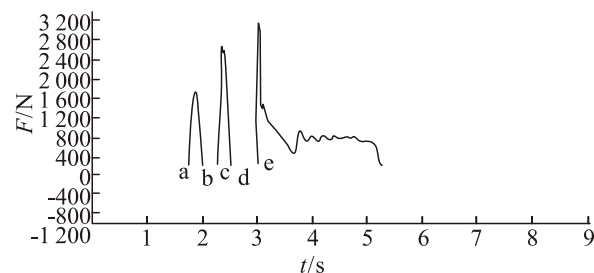
腾空最高点髌、膝关节角度是由 QUALYSIS 系统测出的三维合成的关节角度,而不是在某个平面的角度。髌关节角度定义为肩峰点和大转子点连线与大转子点和胫骨上点连线的夹角。膝关节角度定义为大转子和胫骨上点连线与胫骨上点和外踝点连线的夹角。腾空最高点髌、膝关节的角度关系到运动员的完成分,如果这些角度没有达到最低要求,还会影响到难度分值^[13]。

对比男女3次跳跃腾空最高点髌关节角度我们发现,女运动员无论在单个跳跃,还是在连续跳跃中髌关节角度都明显比男运动员大。规则要求完成屈体分腿跳时,运动员的髌关节角度小于 90° ,而女运动在3个跳跃中的髌关节角度都超过了 90° ,在连续跳跃中的角度甚至达到了 100° 。髌关节角度与运动员的腾空高度是直接相关的,只有保证了足够的腾空,运动员才有时间完成屈体和踢腿的动作,才能使髌关节小于直角。男运动员由于有良好的弹跳力,因而在3个跳跃中的髌关节角度都明显小于 90° ,超出了规则的要求,但从绝对值上来看,男运动员在单个跳跃中髌关节的角度为 62.98° ,而在连跳中髌关节的角度分别为 73.89° 和 71.98° ,可见连续跳跃对动作完成质量还是有影响的,只有具备超强的弹跳能力和踢腿速度,才能保证连续跳跃的质量媲美单个跳跃^[14]。对比3次跳跃腾空最高点男女生膝关节角度我们发现,男女运动员之间不存在显著的差异。因为运动员腾空膝关节的角度取决于膝关节的柔韧性以及形体基本功的练习,不受弹跳力好坏的影响。

2.2 单次跳跃与连续跳跃能力动力学测试结果

动力学指标是通过分析 KISTLER 三维测力台收集的力-时间曲线所得的各阶段力的大小、时间的变化。测力台的测试与 QUALYSIS 系统同步进行,图1

是测力台依据原始数据绘制的一名受试者连续两次屈体分腿跳的力-时间曲线。



(1)a-b 阶段为连续屈体分腿跳第1次起跳阶段, b-c 阶段为第1次腾空阶段, c-d 阶段为第2次起跳阶段, d-e 为第2次腾空阶段)

图1 连续跳力(F)-时间(t)曲线

1) 垂直起跳冲量的变化。

冲量 I 是指运动员起跳阶段力(F)与时间(t)的积分:

$I = \int F dt$ 。由 $Ft = mat = mV_c$, (加速度 a) 看出, 力与时间的乘积(Ft)越大, 静止的物体获得的速度(V_c)就越大; 起跳过程中力不是恒定的, 因此起跳阶段力的冲量其实是由积分得来的, 最终的弹跳效果决定于冲量的大小^[15]。测力台上计算的冲量是指运动员所受向上合外力与时间的乘积, 然而每个人的重力是不同的, 因此本研究将测力台给予运动员向上的反作用力减去重力所得结果乘以起跳时间得出垂直起跳冲量。垂直起跳冲量是对腾空高度和腾空时间的合理解释。

如表2所示, 男女运动员连跳中的第2次起跳冲量最高, 其次是连跳中的第1次起跳冲量, 最低的是单次起跳冲量。独立样本 T 检验结果显示男运动员垂直起跳冲量显著高于女运动员。第2章第2.1节第5)节分析结果显示, 男女运动员的起跳时间(t)无显著差异, 女运动员的平均起跳时间比男运动员约小0.02s, 因此主要影响男女运动员垂直起跳冲量的是蹬伸阶段收缩力(F)^[16]。男运动员的下肢蹬伸力量要远远大于女运动员, 垂直起跳冲量明显优于女运动员。由 $Ft = mat = mV_c$, 结合男女运动员的体重分析, 虽然女运动员体重小, 冲量较小也可能产生较大的蹬伸速度, 但男运动员垂直起跳冲量显著高于女运动员, 已经完全抵消了女运动员因为体重小而产生的补偿。所以男运动员的离板速度还是比女运动员快, 腾空高度和腾空时间因此明显优于女运动员。

表2 不同跳跃中运动员起跳的有效冲量($\bar{x} \pm s$) N·s

性别	n/人	单次跳跃	连跳第1起跳	连跳第2起跳
男	11	317±23	305±17	388±34 ²⁾³⁾
女	15	214±30 ¹⁾	218±46 ¹⁾	277±50 ²⁾³⁾¹⁾

1)与男性比较, $P < 0.01$; 2)与同组单跳比较, $P < 0.01$; 3)与同组连跳第1跳比较, $P < 0.01$

连续跳跃属于典型的超等长收缩,因此通过超等长练习可以有效的提高运动员连续跳跃能力,如目前被广泛使用的跳深练习。Kernozek 等^[17]研究认为,0.35~0.55 m 的跳深练习可以有效地提高运动的弹跳能力,教练员可以根据运动员的能力选择不同的高度进行练习,以期达到最佳效果。另外手臂在起跳过程中的作用也是不容忽视的。已有的研究表明,摆臂显著提高了跳跃的高度,并显著增加了髋关节、踝关节和臀部的功率^[18]。在起跳过程中尽量采用直臂上摆代替曲臂上摆,使肩关节的力矩保持较高的水平,做出更大的功。因此应加强肩关节肌群上摆的力量训练,增加摆动幅度和直臂程度,帮助完成起跳,提高运动员弹跳效果。

3 结论

1)男运动员能够较好地完成连续屈体分腿跳动作,但是在腾空时间、腾空高度、腾空时髋关节角度和垂直起跳冲量指标上与单个屈体分腿跳都有显著性的差异,不如单个屈体分腿跳优异,可见完成连续跳跃难度对于男运动员来说具有一定挑战性。

2)女运动完成连续屈体分腿跳的效果较差,连跳中第2次跳跃除了起跳缓冲时间、腾空时膝关节角度与单个屈体分腿跳无显著差异外,其他指标均显示出显著的差异。腾空的高度明显降低,起跳蹬伸时间显著增加,因此看上去起跳动作拖沓、沉重。建议女运动员尽量规避C组难度的连接。

3)男女运动员在3个跳跃中的腾空时间、腾空高度、髋关节角度、垂直起跳冲量上都表现出了非常显著的差异,而在起跳缓冲时间、蹬伸时间、起跳时间、腾空时膝关节角度上并没有显著的差异。证明了男运动员能够在相同的起跳时间内,获得更好的起跳高度,从而更好完成动作,这主要依赖于男运动员下肢伸肌群强大的向心收缩能力和连跳时优秀的超等长收缩能力。

参考文献:

- [1] 2013-2016年健美操规则[S]. 国际体操联合会健美操委员会, 2012.
- [2] 李铁录,吴升扣. 超等长练习对提高运动员弹跳力效果的实验研究[J]. 北京体育大学学报, 2011, 34(10): 133-137.
- [3] Yu B, Queen R M, Schrodt L A. Effect of external marker sets on between-day repeat ability of knee kinematics and kinetics in stair climbing and level walking[J]. Research in Sport Medical Science, 2003, 11(4): 209-218.
- [4] Alexander E J, Andriacchi T P. Correcting for deformation in skin-based marker systems[J]. Journal of Biomechanics, 2001, 34(3): 355-361.
- [5] 李恩琦. 竞技健美操难度动作分类及力学原理的研究[J]. 山东体育学院学报, 2005, 21(2): 67-68.
- [6] 许春利. 健美操剪式变身跳转 180 度起跳阶段技术分析[J]. 北京体育大学学报, 2007, 30(9): 1293-1294.
- [7] Almeida Silvera M I, PeÀrot C, Goubel F. Neuro-muscular adaptations in rats trained by muscle stretch-shortening[J]. European Journal of Applied Physiology, 1996, 72(3): 261-266.
- [8] Jason D Vescovi, Paul K Canavan, Scott Hasson. Effects of a plyometric program on vertical landing force and jumping performance in college women[J]. Physical Therapy in Sport, 2008, 9(4): 185-192.
- [9] Martel G F, Harmer M L, Logan J M, et al. Aquatic plyometric training increases vertical jump in female volleyball players[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2005, 37(10): 1814-1819.
- [10] D Scott Davis, David A Briscoe, Craig T Markowski, et al. Physical characteristics that predict vertical jump performance in recreational male athletes [J]. Article Physical Therapy in Sport, 2003, 4(4): 167-174.
- [11] Hsien-Te Peng, Thomas W Kernozek, Chen-Yi Song. Quadricep and hamstring activation during drop jumps with changes in drop height[J]. Physical Therapy in Sport, 2011, 12(3): 127-132.
- [12] 刘伟民. 运动员弹跳能力的力学评价[J]. 体育与科学, 2001, 22(2): 54-56.
- [13] 杨峰. 对竞技健美操C组跳与跃类0.9分值难度动作的运动学分析[J]. 山东体育学院学报, 2006, 22(3): 88-89.
- [14] 倪菊萍, 谭吟月. 竞技健美操跳跃类难度动作空中姿态的技术分析[J]. 内蒙古体育科技, 2008, 21(2): 44-45.
- [15] 纪仲秋, 李建设. 运动生物力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 33.
- [16] 李旭龙. 竞技健美操C组跳跃类典型难度动作的运动生物力学分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2010.
- [17] Kernozek H T Peng, A Soderstrom J White. changes in power absorbtion and generation with changes in drop height associatied with plometric barrier jumps[J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40(2): 611-613.
- [18] Adrian Leesa, Jos Vanrenterghem. Understanding how an arm swing enhances performance of the vertical jump[J]. Journal of Biomechanics, 2004(37): 1929-1940.