

文章编号:1004-7220(2017)04-0299-08

· 专家论坛 ·

# 运动损伤生物力学研究

郝卫亚

(国家体育总局 体育科学研究所,北京 100061)

**摘要:** 所有专业和业余运动员都承受着各种急性或者慢性运动损伤,损伤形式随项目不同而各异。生物力学研究是确定运动损伤危险因素和损伤机制的关键。运动损伤生物力学研究一般采用实验、建模仿真以及统计模拟3种方法。从运动损伤的流行病学特征出发,对相关生物力学研究进行较为全面的整理和总结,希望为开展运动损伤生物力学研究、运动损伤防护研究、临床与康复治疗等提供理论基础。

**关键词:** 运动损伤; 损伤机制; 损伤危险; 生物力学

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2017.04.001

## The research on biomechanics of sports injuries

HAO Wei-ya (*China Institute of Sport Science, General Administration of Sport of China, Beijing 100061, China*)

**Abstract:** All professional or amateur athletes sustain different kinds of acute or overused injuries, which vary with sports events. Biomechanics plays the key role in determining risk factors and elucidating injury mechanisms for sports injuries. Three kinds of research methods, experimental test, modeling and computer simulation and statistical simulation, are generally used in biomechanical studies of sports injuries. This paper firstly reviews the epidemiology of sports injuries, and then comprehensively summarizes the related researches on injury biomechanics, in purpose of providing theoretical basis for studies on sports injury biomechanics, prevention of sports injuries, and clinical treatments and rehabilitation.

**Key words:** Sports injury; Injury mechanism; Injury risk; Biomechanics

自人类社会形成以来,人们都在进行健体强身活动,但损伤却一直威胁着运动参与者的健康。生物力学研究能够帮助人们寻找运动损伤的危险因素、阐明损伤机制。本文在回顾运动损伤流行病学特征的基础上,对运动损伤的生物力学研究进行较为全面的整理和总结,为提高运动损伤防护和康复治疗水平提供理论基础。

## 1 运动损伤的流行病学特征

### 1.1 运动损伤的分布

在世界范围内,人们大量参与体育运动。体育

对运动员生理、心理和社会的作用已被广泛研究。体育参与可以提高心肺功能、降低身体脂肪百分比、增加肌肉力量、耐力和爆发力<sup>[1]</sup>。经常性地参与大量撞击类型负荷和跑步相关的项目(如篮球、体操、网球、足球和长跑),可增加全身和局部骨的矿物质含量和密度;相反,不经常参与体育运动可能引起肥胖和冠心病。在心理和情感方面,体育比赛过程中对自身检验能够促进自尊的形成,同时体育可以降低紧张、焦虑和沮丧等<sup>[1]</sup>。在社会方面,体育参与有利于运动员的社会发展,例如适当的行为举止、公平竞争、团队意识以及责任感的形成等<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2016-12-05; 修回日期:2016-12-07

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0803802),国家自然科学基金项目(11672080),国家体育总局体育科学研究所基本科研业务费(基本16-02)。

通信作者:郝卫亚,研究员,博士研究生导师,E-mail:haoweiya@ciss.cn。

尽管体育运动对健康的益处非常多,但它同时也会带来损伤危险。所有专业和业余运动员都承受着各种软组织、骨、韧带、跟腱和神经损伤,这些损伤因创伤或者重复性应力作用引起<sup>[1-3]</sup>。运动创伤通常发生于四肢关节(膝、踝、髌、肩、肘和腕)和头、颈、脊柱,其中膝关节是发生最多的部位<sup>[2-4]</sup>。损伤类型包括有中枢与外周神经系统损伤、撞击、撕裂和擦伤、应力性骨折、关节(非骨)韧带伤、肌肉和肌腱伤等几种主要类型<sup>[2-4]</sup>。例如,膝关节创伤可导致半月板和软骨损伤,有时候还会伴有前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤<sup>[2,5]</sup>。20世纪90年代开展的流行病学调查表明,中国6800多名优秀运动员的患病率达到59.4%,其中急性损伤占21.1%,急性转慢性46.0%,慢性33.0%<sup>[5]</sup>。该调查显示,膝部创伤达到19.3%,其次为踝部的9.0%。但从损伤部位来看,踝腓侧副韧带损伤率达到4.5%,高于膝半月板损伤的4.2%<sup>[5]</sup>。美国全国大学体育协会(national collegiate athletic association, NCAA)对15种项目16年的运动损伤统计表明,每1000人次比赛会发生约13.8次损伤,而同样人次的训练发生约4.0次损伤;这些损伤中下肢损伤超过53.7%,其次是上肢损伤(约20%)<sup>[6]</sup>。NCAA损伤调查还显示,踝关节韧带拉伤占总损伤的14.9%,脑震荡和ACL损伤分别占5.0%和2.6%<sup>[6]</sup>。大多数踝部损伤是韧带拉伤伴随着不完全的撕裂,占83%<sup>[7]</sup>。

由于不同运动项目的动作技术、对抗模式和比赛场地环境(器械)物理力学条件等因素都不同,同时运动员自身生理、心理和生物力学特征也不同,故不同项目的运动损伤发生率、损伤发生方式等都有较大差异。在大型综合性国际比赛期间,运动员损伤率存在项目间的差异。在近年的夏季和冬季奥运会中,运动员损伤率为10%~12%<sup>[8-11]</sup>。在夏季奥运会中,所有项目都存在运动损伤,最高的项目是对抗性项目,如足球、跆拳道、曲棍球、手球等<sup>[9]</sup>。这些项目使得接触性(contact)损伤占总数的1/3,而过劳性(overuse)和非接触性(non-contact)损伤分别为22%和20%;运动员损伤最多类型是踝关节扭伤和大腿拉伤<sup>[10]</sup>。在冬季奥运会中,雪上项目的损伤率最高,为15%~35%,如自由式滑雪空中技巧、单板滑雪(坡式和越野)等;冰球也在冬季项目损伤率

最高的行列中<sup>[8]</sup>。

全世界约有4%(或者2.65亿人)人口参与足球运动,很多运动员每年有损伤经历<sup>[12]</sup>。国际足联对1998~2012年所有国际级赛事中损伤的调查显示,平均每场比赛发生2.6例损伤,或者1000人/h比赛发生77.3例损伤;损伤大多是在球员直接接触时候发生,只有20%是非接触性的;球员遭受最多的是撞击伤(55%),其次是扭伤或肌肉拉伤(10%)<sup>[13]</sup>。根据丹麦2012~2014年儿童(11~15岁)和青少年(16~19岁)足球队参加国际比赛时的损伤调查显示,1000人/h比赛发生15.3例损伤,损伤最多的部位是下肢(66.7%),最多的损伤类型是撞击伤(24.4%)<sup>[12]</sup>。

体操是最高危的运动项目之一,运动员的损伤率处于各类体育项目中的第2位,损伤会导致运动员长期或者永久残疾、早期退行性肌肉骨骼系统紊乱、治疗费用增加、参赛缺失、生活质量降低等<sup>[2]</sup>。

对美国某大学体操队(NCAA一级,即最高级别)运动员的10年调查表明,在每1000人次训练比赛中,男女运动员分别发生损伤8.78次和9.37次,男运动员损伤部位最多是手腕(24.4%),而女运动员最多是足踝(39%);男运动员在单杠和鞍马中更多使用手腕,而女运动员在自由操、跳马和平衡木中则更容易引起下肢损伤<sup>[14-15]</sup>。最近对美国NCAA全部418名女体操运动员的为期5年调查表明,每1000人次的比赛训练中,有9.22例损伤;其中踝关节损伤最多,占总数17.9%,小腿和跟腱13.6%,躯干13.4%,足12.4%<sup>[16]</sup>。在这些损伤中,多数为韧带扭伤和肌肉、肌腱拉伤,69.6%损伤是在使用器械时(如落地垫)发生;自由操落地(41.9%)或者高低杠下法(28.2%)中损伤发生最多<sup>[16]</sup>。另外,对澳大利亚和新西兰体操运动员为期5年的调查表明,损伤部位最多的依次是踝、膝、足、上臂和前臂以及手腕<sup>[15]</sup>。体操损伤中60%以上为急性损伤,主要在落地时发生,自由操损伤最多<sup>[17]</sup>;同时,大多数损伤是在训练时发生,但比赛时损伤的发生率则更高<sup>[17]</sup>。

由于性别差异,大多数项目女运动员的损伤率都大于男性<sup>[5,9-10]</sup>。但在国际足联组织的足球比赛中,女球员损伤率却较低,但儿童和青少年足球球员中,女孩损伤率更高<sup>[13]</sup>。性别不同引起的损伤率差

异,可能与男女运动员对项目动作技术掌握程度、以及比赛中对抗性程度不同有关。

## 1.2 运动损伤的预防

在全面系统地调查运动损伤分布特征基础上,还需要探讨损伤发生的原因和发生过程,分析损伤发生的危险因素,以便制订出科学合理的预防措施<sup>[18]</sup>。目前,运动损伤预防措施主要通过器械改进和训练两种途径<sup>[4]</sup>。器械改进方面,主要有稳定装置(如关节固定支架、裹带)和减震装置(如减震鞋)两大类。训练则通过提高运动员自身的平衡能力、柔韧性、灵敏性、本体感觉、肌肉力量/功率、运动技术以及关节拉伸等<sup>[19]</sup>。很明显,器械改进属于被动性预防,而训练则是主动性预防。除了器械改进和训练外,其他一些措施也可能有效,如改善营养、运动规则调整、教育培训等<sup>[4]</sup>。

从流行病学角度来看,运动损伤的预防应包括4个步骤(见图1)<sup>[19]</sup>。首先,确定运动损伤发生情况和严重程度;其次,确定运动损伤的危险因素和损伤机制;第三,依据损伤的危险因素和损伤机制,引入可能减少损伤或者降低损伤严重程度的预防措施;最后,重复第1步,评估引入预防措施后的效果。

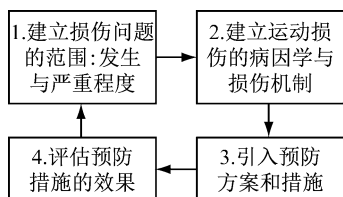


图1 运动损伤预防研究的4个步骤<sup>[19]</sup>

Fig.1 Four step sequences of research on sports injury prevention

## 2 生物力学在运动损伤研究中的作用

### 2.1 运动损伤的力学基础

常用生物力学的术语“损伤机制(injury mechanism)”描述诱发事件中损伤的原因与结果之间的关系。损伤机制就是描述损伤发生过程中“某动作、反应或者结果的基本物理过程”<sup>[18]</sup>。冯元桢认为,损伤机制“等效于机器或结构的损坏”<sup>[20]</sup>。

人体所有器官和组织都承受着一定的力学负荷。通常所说的生理负荷,就是一定范围内的力学负荷,不仅不会造成损伤,而且是机体保持正常生理状态所必需的。运动损伤就是人体器官和组织的力

学负荷超过了正常生理负荷范围所导致的病理性损伤<sup>[18]</sup>。人体骨、关节和软组织(皮肤、肌腱、韧带等)都具有非线性的载荷-变形或应力-应变(率)关系<sup>[18]</sup>。如同工程材料,这些组织都具有各自可承受负荷的阈值(如最大载荷、极限应力、极限应变、最大伸长率等)。人体组织(特别是关节组织和软组织)还具有典型的黏弹性,其负荷不仅与变形有关,还与时间因素或者变形速率有关。急性(acute)损伤就是一次或者几次超过阈值的负荷导致<sup>[18]</sup>。虽然已经积累了大量生物组织载荷-变形曲线及阈值等方面的实验数据,但是这些数据仍然需要不断丰富。

人体组织都具有生长功能,受到载荷变化时会发生适应性重建(adaptive remodeling)。当骨组织发生较小的微损伤后,能够通过修复功能加以修复<sup>[21]</sup>。但是,如果机体没有足够时间对重复性超载产生的微损伤进行及时修复,过劳性或者慢性损伤将会发生<sup>[18]</sup>。无论是业余还是专业跑步运动员,过劳性损伤(如胫骨应力性骨折、髌股关节痛和髌胫束综合症)都是常见损伤<sup>[22]</sup>。青少年过早的运动项目专门化将增加其过劳性损伤的危险性<sup>[23]</sup>。为防止过劳性损伤,美国棒球协会专门制订规则对18岁以下不同年龄段青少年的投掷次数进行限制,例如7~8岁儿童每天不超过50次<sup>[23]</sup>。

### 2.2 生物力学与运动损伤多因素模型的关系

运动损伤预防的4个步骤(见图1)的关键是建立损伤原因,获知为何特定个体处于损伤危险状况下(即危险因素)以及损伤是如何发生的(即损伤机制)<sup>[18]</sup>。通常,危险因素有内部因素(个体的生理和心理特征)和外部因素(环境或者器械)<sup>[18]</sup>。在内部因素中,个体运动员的身体特征包括年龄、性别、身体成分、损伤史、肌肉力量、动作特点、柔韧性、耐力、灵敏度等多种因素;而心理特征则包括运动员的焦虑水平、自尊和自我效能感等<sup>[18]</sup>。运动鞋和地面的摩擦力都属于外部因素<sup>[19]</sup>。虽然内、外因素共同使得运动员易于损伤,为损伤事件做好了“准备”,但只有在诱发事件(inciting event)发生时损伤事件才会降临<sup>[19]</sup>。运动员发生损伤的内、外危险因素与诱发事件构成了十分复杂的相互关系。1994年,Meeuwisse从流行病学角度上提出了损伤发生模型(见图2)<sup>[18]</sup>。

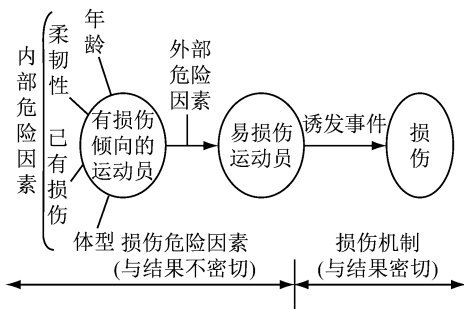

 图2 运动损伤发生的多因素模型<sup>[18]</sup>

Fig.2 Multi-factorial causation model for sports injury

从 Meeuwisse 损伤模型(见图2)看出,个体运动员身体和心理特征共同构成了其损伤的内部危险因素。运动环境物理力学(如地面、器械力学特性)、心理环境、竞赛规则、训练和赛事安排等共同构成了外部危险因素。因此,不同运动员、不同运动项目都必然存在不同的损伤风险特征。在所有的实际损伤事件中,运动员所处的运动环境情形、动作姿势等情况都不尽相同,故损伤机制也会有所不同。例如,在 ACL 损伤中,研究者依照运动员之间是否存在直接接触,把 ACL 损伤划分为接触式和非接触式损伤类型<sup>[19]</sup>。同样为踝关节扭伤,排球和足球运动员的损伤机制就不同。排球运动员多为网前拦网或扣球后落到伙伴或者对方队员足上时踝关节失稳而发生,而足球运动员则多数是在对手侧面阻挡时受到侧向撞击力所致<sup>[19]</sup>。

踝关节急性损伤也是体操最常见的损伤类型,大多在自由操或跳马落地时发生。可以根据 Meeuwisse 损伤发生模型,描绘出体操运动员踝关节损伤的影响因素和损伤发生机制的综合模型(见图3)。根据该模型,可以展开一系列生物力学研究,探讨内部因素中不同因素对组织损伤负荷阈值的影响,分析体操器械和规则对体操动作和损伤事件中踝关节负荷特征的影响,最后还可结合具体损伤案例中踝关节负荷特征,通过计算组织的应力、应变和应变率,分析损伤发生原因。这些研究将较全面地阐明体操运动员踝关节损伤的发生机制和影响关系,为科学地预防损伤提供有力依据。因此,生物力学研究在运动损伤多因素模型中具有核心地位,对阐明损伤发生机制和有效预防损伤意义重大。

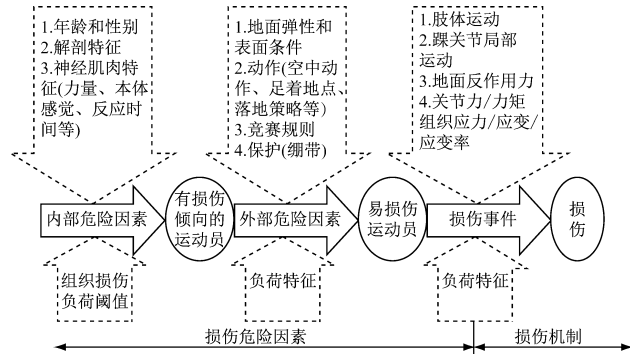


图3 体操运动员踝关节损伤发生的综合模型

Fig.3 Comprehensive causation model for ankle injury of gymnasts

### 3 运动损伤生物力学的研究方法

#### 3.1 实验方法

人们通过各种实验方法,研究人体组织、器官以及细胞载荷-变形的力学关系及其耐受范围。除了在运动损伤研究领域外,这些研究还在交通安全(如汽车、航空和航天)和司法鉴定领域具有重要的应用价值。由于受到伦理和技术等因素的限制,目前所获得的多为尸体、假人和动物等替代品的实验数据。例如,为了获得手腕-前臂联合体撞击耐受负荷,Forman 等<sup>[24]</sup>对 15 具尸体的手腕-前臂联合体标本进行了轴向撞击实验,发现发生骨折概率 50% 的变形为 1.69%,对应的肘部载荷为 4.34 kN。针对跌倒时下颌撞击导致颞颌关节损伤的问题,有研究使用新鲜的尸体头颅标本进行撞击实验,获得撞击负荷的动态曲线,并发现颞颌关节的缓冲作用<sup>[25]</sup>。随着技术的进步,近年来体内测量人体力学性能也开始出现。例如,Sant 等<sup>[26]</sup>基于超声波的弹性成像(elastography)方法在体测量了腓绳肌被动状态下的力学性能,为进一步研究腓绳肌拉伤提供了新的研究手段。

研究运动损伤的发生机制一直是运动损伤生物力学的主要研究内容。这些研究,一般都通过志愿者完成实际体育运动中典型的技术动作,测量完成动作过程中相关的运动学、动力学、肌电等重要指标,然后结合人体生理和解剖特点以及组织器官的力学特征,分析损伤的发生原因。如前所述,不同项目的动作特点不同,运动员经过长期训练后自身的骨骼肌肉系统和神经肌肉系统都具备不同的生理和

力学特征,故运动损伤机制的研究都需针对具体的项目或者动作来展开<sup>[19]</sup>。

跑步和行走是人类最基本的动作,但也会引起运动损伤。为研究跑步引起的过劳性损伤机制,常采用测力台测量跑步过程中垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, VGRF)峰值及其负荷率/loading rate),同时采用运动捕捉系统测量跑步的运动学特征<sup>[22]</sup>。近年来一些学者提倡赤足跑步,认为赤足跑可以降低VGRF,同时也能增强足部力量;但反对者认为赤足缺少鞋的支撑和缓冲,将增加损伤风险<sup>[27]</sup>。但是,最新有关VGRF的回顾性研究表明,有损伤史和无损伤史运动员的最大GRF峰值无差异,但载荷率存在差别,提示载荷率可能是损伤的原因<sup>[22]</sup>。

有关膝关节,特别是ACL运动损伤的研究可能是迄今最多的损伤生物力学研究<sup>[18,28-29]</sup>。针对各种动作的ACL损伤,学者一直通过人体或者尸体实验开展损伤机制以及防护措施的生物力学研究<sup>[30]</sup>。例如,Kiapour等<sup>[31]</sup>通过测量17具下肢尸体标本模拟落地冲击实验时膝关节的运动学参数和ACL应变,证明落地时膝关节在轴向压力与其他负荷(胫骨剪切力、膝关节外展和胫骨内旋力矩)重叠作用下,可导致ACL断裂。Ewing等<sup>[32]</sup>则测量了15名业余运动员从高处落地时下肢关节三维角度、GRF、力矩、功率和功等指标的变化,证明膝关节保护支架具有一定的防护作用。

由于受到伦理和技术等因素的限制,也无法进行志愿者完成典型动作的损伤实验,有关实际运动损伤案例的较完整生物力学数据十分罕见而珍贵。Gehring等<sup>[33]</sup>报道了一名志愿者在完成跑步侧切动作生物力学实验时发生踝关节扭伤的意外损伤案例,研究记录了损伤时的运动学、动力学和下肢肌电数据;该研究提示,踝关节扭伤机制需要考虑大腿力学作用、着地前预备动作和神经肌肉控制等因素。Fong等<sup>[34]</sup>也报道了一例实验室条件下志愿者在穿着篮球鞋完成横切动作时发生的踝关节损伤案例,造成了前距腓韧带的拉伤,实验记录了损伤过程中运动学和足底压力等生物力学数据。除了实验室条件下有限的损伤生物力学数据外,Mok等<sup>[35]</sup>还通过分析北京奥运会比赛时运动员损伤案例的电视转播录像数据,估计踝关节扭伤过程中踝关节的内翻和

内旋角度范围、内翻角速度以及运动时刻特征,探讨损伤的发生机制。

### 3.2 建模仿真方法

尽管对人体和替代品的实验是损伤生物力学的基本研究方法,但实体实验受到伦理、技术、资金和时间等诸多因素限制,因而基于生物力学规律的人体系统建模与计算机仿真成为另外一种损伤生物力学的研究方法。同时,建模仿真方法可获得很多人体和动物实验无法测量的指标,例如关节力、力矩、肌肉收缩力、骨和软组织应力等。目前广泛使用的两类模型是基于人体运动系统结构的多体系统动力学模型和基于人体组织器官力学性质的有限元模型。

利用人体运动系统的建模仿真方法,往往需要对人体实际动作进行运动捕捉,之后与人体多体系统动力学模型结合,进行逆向动力学和/或正向动力学分析,获得人体关节的关节力、力矩、功率和功等力学指标<sup>[36]</sup>,再依此结果评估损伤发生的危险性。例如,Mills等<sup>[37]</sup>建立了个性化体操运动员7环节多体系统模型和多层落地垫模型,通过计算机仿真表明,降低GRF的动作会导致关节力的负荷增加;此外,通过减小落地垫刚度、增加阻尼系数,可以降低落地时GRF以及大腿和小腿的力矩负荷。李旭鸿等<sup>[38]</sup>基于个性化体操运动员的多体系统模型和仿真研究认为,跳马落地垫阻尼改变对运动员下肢关节负荷影响较大,但落地垫刚度改变影响较小。肖晓飞等<sup>[39]</sup>采用建模仿真方法,通过对体操自由操落地动作的仿真研究,发现落地垫的摩擦系数对运动员落地时踝关节负荷影响很大。

目前有关下肢关节损伤研究都基于这样的假设:GRF和/或关节力愈大,损伤危险性也愈大<sup>[40-41]</sup>。这个假设忽略了一个基本的事实:同样的GRF和/或关节力会由于作用方向、位置和负载率不同导致不同的关节软组织、骨最大应力、应变和应变率;损伤的发生危险性自然也不同。对关节损伤的研究,除了需要目前通用的实验和基于多体系统模型的计算机仿真外,还需要通过建立关节及其周围组织的有限元模型,在应力、应变水平探讨不同载荷条件下关节韧带、肌腱、骨的负荷,进一步分析损伤机制。例如,Orsi等<sup>[42]</sup>采用有限元方法仿真研究了膝关节25°屈曲姿态下多种组合运动条件(如内、

外旋、内、外翻)时 ACL 和关节软骨的应力、应变变化,寻找更容易发生 ACL 或软骨损伤的运动形式。Wang 等<sup>[43]</sup>通过建立膝关节的有限元模型仿真研究发现,跪地姿态下膝关节软骨组织的最大应力和接触压强都比站立时要稍大,提示频繁和长时间跪地不利于膝关节损伤的预防。

随着科学技术的日新月异,近年来人们开始了联合仿真研究,进行基于多体系统动力学和有限元法的耦合分析。这样的研究在工程领域已经并不少见,但在运动生物力学领域的研究还鲜有报道。为分析日常活动对髌关节置换术后髌关节稳定性的影响,Kunze 等<sup>[44]</sup>采用多体系统动力学模型计算了患者从椅子起立时的肌肉力量,之后将肌肉力量作用于骨盆有限元模型,发现椅子高度对植入体微小运动有明显影响。为探讨飞行员弹射救生中承受冲击性加速度时的脊柱损伤,Du 等<sup>[45]</sup>建立胸椎-骨盆联合体非线性有限元模型,同时应用多体系统动力学模型将座椅束缚系统引入有限元模型中,结果发现飞行员在放松状态下脊柱的应力负荷更大,发生损伤的危险性也将更大,这与传统观点一致。

如果说人体多体系统动力学模型和有限元模型分别是器官水平和组织水平的模型,近年来出现的基于细胞力学或者细胞重建机制的模型则是细胞水平的模型。Dao<sup>[46]</sup>将3个尺度的模型汇总在一个计算 workflow 中,采用多体系统模型将运动学数据转化为器官的受力边界条件,采用有限元模型计算组织在受力边界条件下的负荷,最后基于细胞重建机制计算组织在负荷条件下的细胞生长变化。丁海等<sup>[21]</sup>也利用有限元模型,在微观尺度研究了松质骨小梁应力与微损伤的关系。

### 3.3 蒙特卡罗模拟方法

蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟方法是一种基于计算机的统计抽样方法,大约始于1945年电子计算机出现后;这种以概率统计理论为指导的数值模拟方法,使用随机数(伪随机数)来解决很多计算问题。目前该方法已经在物理学、化学、生物学、工程以及经济学等多个领域有广泛的应用。

运动损伤的发生与内、外部多个因素有关,采用对比实验或者计算机仿真方法无法穷尽所有相关影响因素的随机变化对损伤发生的影响。因此,引入蒙特卡罗模拟方法可以研究损伤和危险因素的关系。

例如,可以通过使用以 ACL 负荷为因变量的生物力学模型,根据模型中不同自变量(如身高、膝屈角、GRF、股后肌群肌力)的概率分布状态大量次地随机取值,采用生物力学模型计算每次随机取值时的 ACL 负荷,从而获得损伤概率<sup>[47]</sup>。Eberle 等<sup>[48]</sup>为研究高山滑雪中落地时 ACL 损伤问题,建立一个包括4个人体环节和9段滑板的二维多体系统模型,采用蒙特卡罗模拟方法,对触地前100 ms 的关节和躯干角度进行随机扰动,发现在损伤危险落地姿态中,滑雪靴的后部刚度增加会导致股四头肌和滑雪靴对胫骨向前作用力增加,从而引起 ACL 的负荷增加,损伤危险性也加大。Smith 等<sup>[49]</sup>把一个包括14条韧带和关节软骨的膝关节的模型引入下肢肌肉骨骼模型中,采用蒙特卡罗数值模拟方法发现,行走着地时相中膝关节负荷、关节接触面积都与 ACL 以及内、外侧副韧带的刚度或者应变密切相关。

## 4 结论

运动损伤不可消灭,但可以减少。运动生物力学研究是运动损伤机制研究中最重要的重要组成部分,是减少运动损伤的关键。人们不断通过各种研究方法,探讨各种类型运动损伤的发生机制,揭示各种内、外部危险因素影响损伤发生的规律。在此基础上,制订和实施减少损伤发生的措施,评估预防效果并不断提高防护效果。

尽管人类针对运动损伤生物力学研究进行了长期不懈的努力,但仍然有很多关键问题尚待更深入研究,可能包括以下几个方面:①研究针对不同项目特征各种关键技术动作的损伤机制,以及相关防护措施和装备的评估改进;②研发新型个性化、智能化运动防护装备;③研究人体(特别是个性化人体)不同组织器官的力学特征,特别是对负荷的耐受范围;④研究人体运动模式规律,包括运动过程中动作控制与力学因素的耦合关系;⑤整合不同层次(器官、组织和细胞)下损伤生物力学的研究成果,进行跨尺度综合研究,建立损伤发生机制的理论;⑥定量描述体育运动中肢体受力→组织应力→微损伤→修复→适应→再运动的动态过程。诚然,解决这些问题受到生物医学、测量手段、计算技术等诸学科发展的限制,但随着损伤生物力学的研究不断深化,运动损伤的预防必将更加有效。

## 参考文献:

- [1] MAFFULLI N, LONGO UG, GOUGOULIAS N, *et al.* Sport injuries: A review of outcomes [J]. *Br Med Bull*, 2011, 97: 47-80.
- [2] 曲绵域, 于长隆. 实用运动医学[M]. 4版. 北京: 北京大学医学出版社, 2005: 457-964.
- [3] 王予彬, 王人卫, 陈佩杰. 运动创伤学[M]. 2版. 北京: 人民军医出版社, 2013: 1-245.
- [4] MCBAIN K, SHRIER I, SHULTZ R, *et al.* Prevention of sports injury I: A systematic review of applied biomechanics and physiology outcomes research [J]. *Br J Sports Med*, 2012, 46(3): 169-173.
- [5] 任玉衡, 田得祥. 中国优秀运动员运动创伤流行病学研究[M]. 北京: 国家体育总局科教司, 1999: 1-57.
- [6] HOOTMAN JM, DICK R, AGEL J. Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: Summary and recommendations for injury prevention initiatives [J]. *J Athl Train*, 2007, 42(2): 311-319.
- [7] NELSON AJ, COLLINS CL, YARD EE, *et al.* Ankle injuries among United States high school sports athletes, 2005-2006 [J]. *J Athl Train*, 2007, 42(3): 381-387.
- [8] ENGBRETSSEN L, STEFFEN K, ALONSO JM, *et al.* Sports injuries and illnesses during the Winter Olympic Games 2010 [J]. *Br J Sports Med*, 2010, 44(11): 772-780.
- [9] ENGBRETSSEN L, SOLIGARD T, STEFFEN K, *et al.* Sports injuries and illnesses during the London Summer Olympic Games 2012 [J]. *Br J Sports Med*, 2013, 47(7): 407-414.
- [10] JUNGE A, ENGBRETSSEN L, MOUNTJOY ML, *et al.* Sports injuries during the Summer Olympic Games 2008 [J]. *Am J Sports Med*, 2009, 37(11): 2165-2172.
- [11] SOLIGARD T, STEFFEN K, PALMER-GREEN D, *et al.* Sports injuries and illnesses in the Sochi 2014 Olympic Winter Games [J]. *Br J Sports Med*, 2015, 49(7): 441-447.
- [12] KOLSTRUP LA, KOOPMANN KU, NYGAARD UH, *et al.* Injuries during football tournaments in 45,000 children and adolescents [J]. *Eur J Sport Sci*, 2016, 16(8): 1167-1175.
- [13] JUNGE A, DVORAK J. Injury surveillance in the World Football Tournaments 1998-2012 [J]. *Br J Sports Med*, 2013, 47(12): 782-788.
- [14] WESTERMANN RW, GIBLIN M, VASKE A, *et al.* Evaluation of men's and women's gymnastics injuries: A 10-year observational study [J]. *Sports Health*, 2015, 7(2): 161-165.
- [15] BRADSHAW EJ, HUME PA. Biomechanical approaches to identify and quantify injury mechanisms and risk factors in women's artistic gymnastics [J]. *Sports Biomech*, 2012, 11(3): 324-341.
- [16] KERR ZY, HAYDEN R, BARR M, *et al.* Epidemiology of National Collegiate Athletic Association women's gymnastics injuries, 2009-2010 through 2013-2014 [J]. *J Athl Train*, 2015, 50(8): 870-878.
- [17] O'KANE JW, LEVY MR, PIETILA KE, *et al.* Survey of injuries in Seattle area levels 4 to 10 female club gymnasts [J]. *Clin J Sport Med*, 2011, 21(6): 486-492.
- [18] WHITING WC, ZERNICKE RF. Biomechanics of musculoskeletal injury [M]. 2nd ed. Champaign: Human Kinetics, 2008: 1-202.
- [19] BAHR R, KROSSHAUG T. Understanding injury mechanisms: A key component of preventing injuries in sport [J]. *Br J Sports Med*, 2005, 39(6): 324-329.
- [20] FUNG Y. Accidental injury: Biomechanics and prevention [M]. New York: Springer-Verlag, 1993: 1-252.
- [21] 丁海, 朱振安, 薛晶, 等. 骨质疏松症对松质骨小梁应力与微损伤关系的影响[J]. *医用生物力学*, 2015, 30(1): 68-73.
- [22] DING H, ZHU ZA, XUE J, *et al.* Influences of osteoporosis on relationship between trabecular stress and micro-damage [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(1): 68-73.
- [23] VAN DER WORP H, VRIELINK JW, BREDEWEG SW. Do runners who suffer injuries have higher vertical ground reaction forces than those who remain injury-free? A systematic review and meta-analysis [J]. *Br J Sports Med*, 2016, 50(8): 450-457.
- [24] FEELEY BT, AGEL J, LAPRADE RF. When is it too early for single sport specialization? [J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44(1): 234-241.
- [25] FORMAN J, PERRY B, ALAI A, *et al.* Injury tolerance of the wrist and distal forearm to impact loading onto outstretched hands [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2014, 77(3 Suppl 2): S176-83.
- [26] 郝卫亚, 王美青, 何杨举, 等. 羊和人类部受钝物撞击时动载变化特征及颞颌关节的缓冲作用[J]. *航天医学与医学工程*, 1999, 12(3): 173-176.
- [27] LE SANT G, ATEES F, BRASSEUR JL, *et al.* Elastography study of hamstring behaviors during passive stretching [J]. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0139272.
- [28] ALTMAN AR, DAVIS IS. Prospective comparison of running injuries between shod and barefoot runners [J]. *Br J Sports Med*, 2016, 50(8): 476-480.
- [29] GOKELER A, BENJAMINSE A, VAN ECK CF, *et al.* Return of normal gait as an outcome measurement in ACL reconstructed patients. A systematic review [J]. *Int J Sports*

- Phys Ther, 2013, 8(4): 441-451.
- [29] PASZKEWICZ J, WEBB T, WATERS B, *et al.* The effectiveness of injury-prevention programs in reducing the incidence of anterior cruciate ligament sprains in adolescent athletes [J]. J Sport Rehabil, 2012, 21(4): 371-377.
- [30] ALMONROEDER TG, GARCIA E, KURT M. The effects of anticipation on the mechanics of the knee during single-leg cutting tasks: A systematic review [J]. Int J Sports Phys Ther, 2015, 10(7): 918-928.
- [31] KIAPOUR AM, DEMETROPOULOS CK, KIAPOUR A, *et al.* Strain response of the anterior cruciate ligament to uniplanar and multiplanar loads during simulated landings: Implications for injury mechanism [J]. Am J Sports Med, 2016, 44(8): 2087-2096.
- [32] EWING KA, BEGG RK, GALEA MP, *et al.* Effects of prophylactic knee bracing on lower limb kinematics, kinetics, and energetics during double-leg drop landing at 2 heights [J]. Am J Sports Med, 2016, 44(7): 1753-1761.
- [33] GEHRING D, WISSLER S, MORNIEUX G, *et al.* How to sprain your ankle: A biomechanical case report of an inversion trauma [J]. J Biomech, 2013, 46(1): 175-178.
- [34] FONG DT, HONG Y, SHIMA Y, *et al.* Biomechanics of supination ankle sprain: A case report of an accidental injury event in the laboratory [J]. Am J Sports Med, 2009, 37(4): 822-827.
- [35] MOK KM, FONG DT, KROSSHAUG T, *et al.* Kinematics analysis of ankle inversion ligamentous sprain injuries in sports: 2 cases during the 2008 Beijing Olympics [J]. Am J Sports Med, 2011, 39(7): 1548-1552.
- [36] 郝卫亚. 人体运动的生物力学建模与计算机仿真进展[J]. 医用生物力学, 2011, 26(2): 97-104.  
HAO WY. Advances in biomechanical modeling and computer simulation of human movement [J]. J Med Biomech, 2011, 26(2): 97-104.
- [37] MILLS C, PAIN MT, YEADON MR. Reducing ground reaction forces in gymnastics' landings may increase internal loading [J]. J Biomech, 2009, 42(6): 671-678.
- [38] 李旭鸿, 郝卫亚, 于佳彬, 等. 基于 LifeMod 对跳马过程中体操运动员-落地垫动力学关系的计算机仿真[J]. 体育科学, 2013, 33(3): 81-87.
- [39] XIAO X, HAO W, LI X, *et al.* The influence of landing mat composition on ankle injury risk during a gymnastic landing: A biomechanical quantification [J]. Acta Bioeng Biomech, 2017, 19(1): 105-113.
- [40] SEEGMILLER JG, MCCAWE ST. Ground reaction forces among gymnasts and recreational athletes in drop landings [J]. J Athl Train, 2003, 38(4): 311-314.
- [41] GITTOES MJ, IRWIN G, KERWIN DG. Kinematic landing strategy transference in backward rotating gymnastic dismounts [J]. J Appl Biomech, 2013, 29(3): 253-260.
- [42] ORSI AD, CHAKRAVARTHY S, CANAVAN PK, *et al.* The effects of knee joint kinematics on anterior cruciate ligament injury and articular cartilage damage [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2016, 19(5): 493-506.
- [43] WANG Y, FAN Y, ZHANG M. Comparison of stress on knee cartilage during kneeling and standing using finite element models [J]. Med Eng Phys, 2014, 36(4): 439-447.
- [44] KUNZE M, SCHALLER A, STEINKE H, *et al.* Combined multi-body and finite element investigation of the effect of the seat height on acetabular implant stability during the activity of getting up [J]. Comput Methods Programs Biomed, 2012, 105(2): 175-182.
- [45] DU C, MO Z, TIAN S, *et al.* Biomechanical investigation of thoracolumbar spine in different postures during ejection using a combined finite element and multi-body approach [J]. Int J Numer Method Biomed Eng, 2014, 30(11): 1121-1131.
- [46] DAO TT. Advanced computational workflow for the multi-scale modeling of the bone metabolic processes [J]. Med Biol Eng Comput, 2016, DOI: 10.1007/s11517-016-1572-z.
- [47] 李翰君, 刘卉, 张美珍, 等. 确定前交叉韧带损伤概率及危险因素随机生物力学模型与模拟[J]. 体育科学, 2014, 34(12): 37-43.
- [48] EBERLE R, HEINRICH D, KAPS P, *et al.* Effect of ski boot rear stiffness (SBRS) on maximal ACL force during injury prone landing movements in alpine ski racing: A study with a musculoskeletal simulation model [J]. J Sports Sci, 2016, DOI: 10.1080/02640414.2016.1211309.
- [49] SMITH CR, LENHART RL, KAISER J, *et al.* Influence of ligament properties on tibiofemoral mechanics in walking [J]. J Knee Surg, 2016, 29(2): 99-106.