

文章编号:1004-7220(2018)06-0523-06

# 旋前-外旋型三踝骨折逆移位手法复位有限元分析

刘广伟<sup>1,2</sup>, 成永忠<sup>1</sup>, 祝建飞<sup>1</sup>, 冯敏山<sup>1,2</sup>, 程灏<sup>1</sup>, 张琪<sup>1</sup>, 邱鹏<sup>1</sup>, 贺达<sup>1</sup>, 蔡静怡<sup>1</sup>

(1. 中国中医科学院 望京医院, 北京 100102; 2. 中医正骨技术北京市重点实验室, 北京 100007)

**摘要:**目的 结合临床经验应用有限元方法探讨旋前-外旋型三踝骨折逆移位手法复位的可行性。方法 基于CT影像及骨骼韧带等组织解剖特点、材料参数,构建国人年轻男性筋骨完整的正常踝关节模型;根据旋前-外旋型三踝骨折的相关特点,在恰当的位置进行截骨造模,建立筋骨结构完整的旋前-外旋型三踝骨折有限元模型;在有限元骨折模型上进行逆移位手法复位力学加载。结果 通过位移加载,所建旋前-外旋型三踝骨折有限元模型得到了有效的复位。结论 通过对逆移位手法复位旋前-外旋型三踝骨折进行有限元分析,在临床经验的基础上进一步证明了逆移位手法复位方法具有一定的可行性、有效性及科学性。

**关键词:**旋前-外旋型;三踝骨折;逆移位手法复位;有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.06.008

## Finite Element Analysis on Manual Reduction with Inverse Shift for Pronation-Extorsion Trimalleolar Fracture

LIU Guangwei<sup>1,2</sup>, CHENG Yongzhong<sup>1</sup>, ZHU Jianfei<sup>1</sup>, FENG Minshan<sup>1,2</sup>, CHENG Hao<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>, QIU Peng<sup>1</sup>, HE Da<sup>1</sup>, CAI Jingyi<sup>1</sup>

(1. Wangjing Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China; 2. Beijing Key Laboratory of Chinese Manipulative Technique, Beijing 100007, China)

**Abstract: Objective** To investigate the feasibility of manual reduction with inverse shift for pronation-extorsion trimalleolar fracture by applying the finite element method combined with clinical experience. **Methods** Based on CT images and anatomical features of bone, ligaments and other tissues as well as material parameters, a normal ankle model with completed muscles and bones for a Chinese young male was established. According to the related characteristics of the pronation-extorsion trimalleolar fractures, fracture was simulated in the proper position to make osteotomy model. The finite element model of pronation-extorsion trimalleolar fractures was thus established and then applied with mechanical loading to simulate manual reduction with inverse shift. **Results** The established finite element model of pronation-extorsion trimalleolar fractures was effectively restored by the displacement loading. **Conclusions** The finite element analysis on pronation-extorsion trimalleolar fractures by inverse shift maneuver could further prove the feasibility, effectiveness and scientificity of manual reduction with inverse shift based on clinical experience.

**Key words:** pronation external rotation; trimalleolar fracture; manual reduction with inverse shift; finite element analysis

收稿日期:2017-12-13; 修回日期:2018-02-26

基金项目:北京市自然科学基金项目(7172243),首都临床特色应用研究与成果推广项目(Z161100000516111)

通信作者:成永忠,主任医师,E-mail: bless518@139.com

踝关节骨折是临床常见关节内骨折,近年来其发病率呈上升趋势<sup>[1]</sup>。临床治疗需要予以解剖复位联合坚强内固定,以确保患者的早期功能锻炼,并降低并发症发生率<sup>[2]</sup>。目前临床手法治疗上以逆损伤机制手法复位为主,而逆损伤机制手法是基于造成骨折损伤原因的逆向手法复位操作,复位顺序为:拔伸牵引、内收纠正距骨脱位、推顶外踝、推顶内踝、推顶后踝。逆移位手法是基于骨折处骨骼位移的逆向手法复位操作,复位顺序为:拔伸牵引、整体扣挤纠正脱位、推顶外踝、推顶内踝、推顶后踝。本文在结合临床经验的基础上,采用有限元分析方法对旋前-外旋型三踝骨折逆移位手法复位进行研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 图像采集

一般资料:1名25岁健康男性(身高172 cm,质量62 kg,排除踝关节及足部病变)自愿提供检测数据信息。影像学资料:采用GE公司BrightSpeed扫描仪,对该成年志愿者下肢从胫骨下1/3以下进行全程扫描,扫描条件120 kV、280 mA、层厚1 mm、层距1 mm。踝部CT各断层图像以DICOM格式刻录在光盘上保存,其中CT图像338张。

### 1.2 模型建立

将DICOM格式的CT断层医学影像导入软件Mimics 10.01中,分别重建出胫骨、距骨、腓骨,并把距骨下面的多块骨骼(包括跟骨、足舟骨、内外侧楔

骨、骰骨、中间楔骨等)融合,输出STL文件。将此STL格式文件导入Geomagic Studio 12.0软件中进一步光滑修改处理,将重建出的骨骼模型导入到SolidWorks 2016中,生成骨骼的实体模型并装配,最终导入ANSYS 14.0软件进行网格划分,建立正常人完整的踝关节三维有限元模型[见图1(a)]。根据旋前-外旋型三踝骨折的相关特点,在恰当的位置进行截骨造模,建立筋骨结构完整的旋前-外旋型三踝骨折有限元模型[见图1(b)]。韧带与骨、跟骨与距骨之间采用绑定接触,距骨与胫腓骨、胫腓骨之间采用面面接触,摩擦因数为0.1。

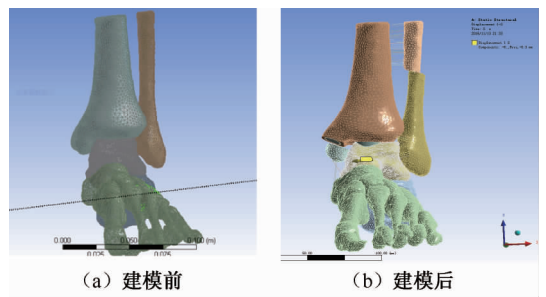


图1 踝关节有限元模型

Fig. 1 Finite element model of ankle joint (a) Before modeling, (b) After modeling

### 1.3 约束与材料参数设定

设定所涉及材料的力学特性均为均质和各向同性。约束胫腓骨上表面。根据各组织解剖特点,并参考文献和本课题组前期尸体解剖数据,设定具体韧带参数(见表1)以及各项材料特性参数(见表2)。

表1 国人踝关节生物力学参数<sup>[3-5]</sup>

Tab. 1 Biomechanical parameters of ankle joint from Chinese people

材料	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	横截面积/mm <sup>2</sup>	弹性模量/MPa
距腓前韧带	11.67 ± 1.87	9.09 ± 2.22	2.26 ± 0.45	20.61 ± 6.51	36.98 ± 32.39
距腓后韧带	18.99 ± 2.30	6.78 ± 1.72	4.05 ± 1.40	27.71 ± 11.79	60.00 ± 12.84
跟腓韧带	22.08 ± 6.68	7.04 ± 3.21	3.17 ± 0.27	22.38 ± 10.28	117.49 ± 85.31
胫舟韧带	30.44 ± 5.02	12.13 ± 2.08	2.74 ± 0.63	33.10 ± 8.87	35.30 ± 16.46
胫跟韧带	18.65 ± 3.46	12.64 ± 3.98	2.22 ± 0.32	28.20 ± 9.73	35.55 ± 12.32
胫距韧带	7.52 ± 1.47	16.49 ± 0.64	6.38 ± 1.72	105.30 ± 29.27	4.42 ± 0.60
下胫腓前韧带	14.35 ± 2.72	16.80 ± 2.07	3.31 ± 0.65	55.26 ± 11.37	32.95 ± 20.86
下胫腓后韧带	13.47 ± 3.93	15.35 ± 2.27	4.12 ± 1.28	61.46 ± 15.63	17.40 ± 11.61
骨间膜	20.96 ± 3.25	49.63 ± 3.08	0.56 ± 0.16	28.12 ± 9.51	16.93 ± 7.86

### 1.4 载荷加载

**第1步** 在跟骨及距骨上加载1个负Z方向0.3 mm位移载荷[见图2(a)黄色箭头]。

**第2步** 在距骨及近端腓骨分别加载1个负X方向4、2 mm位移载荷[见图2(b)黄色箭头]。

**第3步** 在腓骨骨折线分别加载1个负X方

向 3.5 mm、负 Y 方向 1 mm、Z 方向 1.5 mm 位移载荷[见图 2(c)黄色箭头]。

**第 4 步** 在内踝骨折线处分别加载 1 个负 X

表 2 单元类型及材料属性<sup>[6-7]</sup>

Tab.2 Element typpss and material properties

构件	单元类型	弹性模量/GPa	泊松比
密质骨	实体	18.60	0.30
松质骨	实体	7.30	0.40
韧带	杆	0.26	0.49

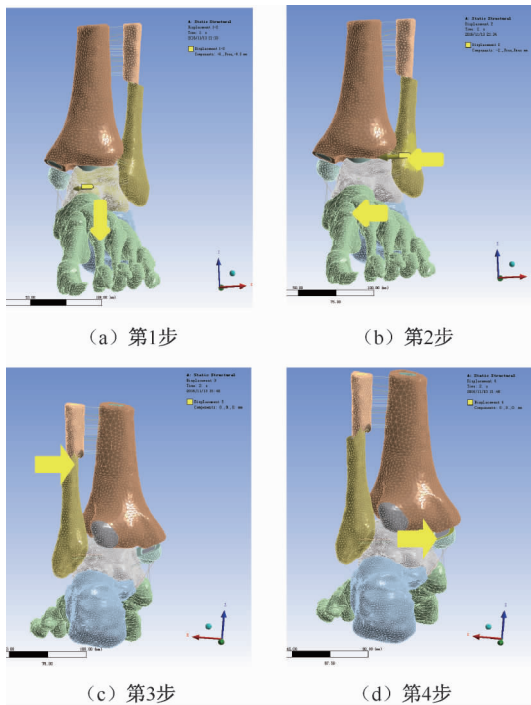


图 2 载荷加载

Fig.2 Loading (a) Step 1, (b) Step 2, (c) Step 3, (d) Step 4

表 3 位移载荷与力的求解

Tab.3 Solution of displacements and forces

顺序	步骤	位移载荷/mm	F/N	M/(mN·mm)
第 1 步	拔伸牵引	Z -0.3	Z -928.2	
第 2 步	整体扣挤	$X_1 - 4, X_2 - 2$	$X_1 - 1\ 557, Y_1 - 508.97, Z_1 - 2363.6$	
			$X_2 - 1\ 820, Y_2 - 260.44, Z_2 - 49.095$	
第 3 步	推顶外踝	$X - 3.5, Y - 1, Z - 1.5$		$X_1 - 36.978, Y_1 - 0.101, Z_1 - 220.96$
				$X_2 - 98.482, Y_2 - 44.829, Z_2 - 25.107$
第 4 步	推顶内踝	$X - 4.7, Y - 3, Z - 6.4$		$X - 0.025\ 2, Y - 0.026, Z - 0.019$

表 3 中部分力学求解数据偏大,临床上很难实现原因是:① 三踝骨折模型中缺少皮肤、实体韧带、软组织等大量缓冲手法力的组织结构;② 松质骨、皮质

方向 4.7 mm、负 Y 方向 3 mm、Z 方向 6.4 mm 位移载荷[见图 2(d)黄色箭头]。

## 2 结果

### 2.1 有限元模型建立情况

建立三踝骨折的有限元模型,细节损失小,模型平滑,各细小解剖结构和部位清晰四面体单元数目多,单元大小适中,其中踝关节三维有限元模型生成节点总数 290 094,单元总数 79 033。

### 2.2 三踝骨折逆移位手法复位有效复位

复位过程逼真,加载位移载荷后实现了有效复位(见图 3),并成功进行了力的求解(见表 3)。

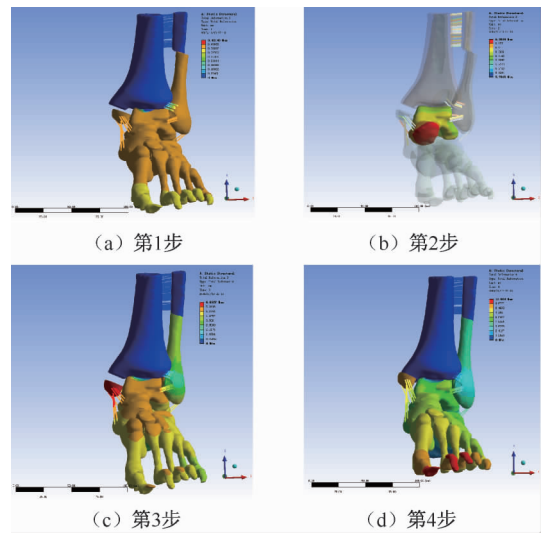


图 3 施加不同载荷后复位图

Fig.3 Reposition charts after applying different loads

(a) Step 1, (b) Step 2, (c) Step 3, (d) Step 4

骨很难完美地分开,且没有统一的骨质参数。有限元分析是为了研究整体运动趋势及力学变化,故认为该模型有意义,后期需要大量研究工作不断地完善。

## 2.3 有限元逆移位手法复位方案总结及力学机制

结合临床经验及有限元分析结果,总结逆移位手法复位方案,主要分为两步:

(1) 整体逆脱位复位:① 拔伸牵引,② 对合扣挤。根据旋前-外旋型三踝骨折的损伤机制以及足踝关节特有的生物力学结构,采用拔伸牵引和对合扣挤的手法使大部分损伤骨块在肌肉和韧带等组织的带动下实现自我复位。

(2) 局部逆骨块移位复位:① 推按挤扣,② 推挤触碰。纠正余下畸形脱位,针对在整体复位手法过程中无法实现复位的部分骨块,根据其脱位的位移情况,用手法迫使其逆向位移,实现局部复位。

本文通过旋前-外旋型三踝骨折手法复位有限元分析,在临床经验的基础上进一步证明逆移位手法复位方法具有一定的可行性、有效性及科学性。有限元方法是一种有效而精确的分析方法,应用有限元方法研究传统手法,能使之更标准、更客观,为传统手法作用机制的研究提供一个广阔的前景。

## 3 讨论

### 3.1 模型的仿真性与合理性

目前,国内鲜有相关踝关节韧带参数测量的报道,此前国内建立的有限元模型基本都是参照国外的数据。实际上,由于国内外种族及个体差异较大,利用国外数据进行国人标本的有限元分析研究有失真性。本文在添加韧带和定义韧带材料属性方面均采用前期测量的国人数据,精确定义韧带的附着点面积及长度、弹性模量等特性,尽可能实现仿真的目的。在此基础上完成了筋骨完整的旋前-外旋型三踝骨折的有限元建模,这一模型更能体现国人足踝特点,为研究国人足踝生理功能及病理损伤机制提供参考。

人体的胫、腓骨部分是由骨密质、骨松质及髓腔三部分组成的。而在许多研究中,胫、腓骨常被重建为实心体,且材料特性全部按照骨密质处理,忽略了骨松质的影响。Parr等<sup>[8]</sup>认为,松质骨及软组织部分对足踝的模拟研究结果有不可忽视的影响,强调了在模型中考虑松质骨及软组织的重要性,为后阶段做此项研究的学者指出了新的发展方向。在目前的许多研究中,研究者忽视了这骨密质、骨松质的作用,导致实验研究结果存在偏差。

本文的建模研究将骨密质、骨松质及髓腔进行了有效区分。

本课题前期研究采用“壳单元”作为足踝模型的韧带材料<sup>[9]</sup>。“壳单元”的特性是“可拉伸、可压缩”,而实际人体韧带应该是“可拉伸、不可压缩”。因此,本文采用与真实韧带具有相同特性的“杆单元”来替代“壳单元”。

### 3.2 逆移位手法在距骨脱位复位中的应用

成永忠等<sup>[10-11]</sup>根据中医正骨手法与外固定器相结合使用的临床经验,提出了基于距骨脱位的三踝骨折独立分型,伴有距骨脱位的非稳定型分为:I型(距骨向外侧脱位)、II型(距骨向外后脱位)、III型(距骨向后脱位)。根据旋前-外旋型三踝骨折骨块脱位的脱位特性,提出了先整体复位后局部复位的逆移位手法复位。

逆移位手法复位在伴有距骨脱位的非稳定型复位中具有独特的优势,在整体拔伸叩挤距骨完全复位后,再进行进一步局部复位,不会出现损伤神经血管的情况。逆移位手法复位可以实现精确的距骨整复,而不是简单凭经验施加内旋内收的整复,能在一定程度上避免距骨撞击内外踝导致新的损伤。而在逆损伤机制手法复位过程中进行内收内旋,距骨在脱位状态下旋转,很容易再次撞击内外踝,导致骨折块进一步移位,甚至出现肌腱卡压、神经血管损伤等医源性损伤。逆移位手法复位方法具有一定的可行性、有效性及科学性,其与传统逆损伤机制的复位方法可以互补应用,结合使用,灵活变通,服务于临床,达到良好的复位效果。

### 3.3 有限元分析法在中医正骨手法复位中的应用

中医正骨手法的临床应用相当广泛,具有治疗效果高、费用低、损伤轻、疗效快等优点,但由于缺乏公认的规范和客观的定量标准,一直受到一些学者批评或质疑。因此,如何应用先进的方法研究传统手法的相关生物力学问题显得非常重要。近年来,已有不少学者利用先进的计算机技术和有限元分析方法研究传统手法,为手法作用机制的研究提供了一个新的研究方向。成永忠等<sup>[12]</sup>先用有限元方法初步探讨分析三踝骨折独立分型生物力学机制的可行性,并探讨三踝骨折独立分型方法指导外固定架治疗三踝骨折的临床治疗方案意义;而后建立筋骨结构较完整的旋后-外旋及旋前-外旋踝关节

损伤模型<sup>[9,13]</sup>,分析其损伤的力学机制,计算出的踝关节应力及胫距关节面的压力分布符合临床中Lauge-Hanson分型的描述,并验证旋后-外旋型应力符合经典的Anderson实验<sup>[14]</sup>。但目前的研究主要针对推拿手法,对骨折复位手法的研究少见报道。正骨手法主要还是依靠临床医生的前期经验,具有一定的主观性,缺乏公认的规范和客观的定量标准。因此,本文探讨应用有限元方法研究复位手法治疗旋前-外旋型三踝骨折,通过模拟旋前-外旋型国人的三踝骨折逆移位手法复位加载过程,验证逆移位手法复位方案的可行性,得到逆移位手法复位的特点及趋势,即先整体复位再进行局部复位的总原则,复位顺序较传统复位有差异,具体在于距骨的整复及局部整复方面。

### 3.4 有限元方法的有效性及其优点

尽管个人手法复位经验方法存在不同,但都遵循手法复位的基本原则,即一般先牵引整体后局部复位,本文的实验方法也证实了这一点。从研究结果可知,在复位过程中施加向下位移载荷模拟牵引力后,腓骨短缩的症状得到了一定的改善;在拔伸复位过程中施加位移载荷后,韧带逐渐紧张并表现出明显的张应力,而且逐渐增大;距骨脱位有逐渐复位的趋势,尤其在整体叩挤复位过程中,内、外、后踝出现较大的位移变化;由于距骨的复位带动腓骨运动,出现了一定外侧成角,比较符合该型三踝骨折的复位过程,这些都足以说明本方法的有效性。复位过程中力及扭矩的大小不太符合临床实际,推测原因是有限元模型没有完全实现正常人体足踝周围肌肉、肌腱及筋膜的牵拉维持作用,故与真实的旋前-外旋型三踝骨折的情况相比有所差距,需要进一步改进。本文方法相对于以往的传统生物力学实验研究方法具有独特的优势:有限元模型与真实人体非常接近,可通过复制反复使用模拟手法复位过程,极大节约了人力、物力资源。利用有限元法将临床复位手法进行逐步分解,然后通过位移载荷施加到模型的面或节点上,根据需要调节位移载荷的大小和方向,全过程由计算机自动运行完成,提高了手法的模拟精确度。

## 4 结语

应用有限元方法探讨三踝骨折的手法复位,其

意义在于初步建立三踝骨折逆移位手法复位的方案,验证该方案的可行性及有效性,为进一步规范骨折复位手法、提高复位疗效提供一种可靠而精确的研究方法。本文成功建立了旋前-外旋型三踝骨折有限元模型,并结合临床中外固定器治疗三踝骨折手法复位正骨经验,进行有限元逆移位手法复位模拟研究。通过有限元手法复位分析,结合临床实际总结出逆移位机制的有限元手法复位方案,其与传统逆损伤机制的复位方法有较大差异,逆移位手法复位方法具有一定的可行性、有效性及科学性。逆移位手法复位与传统逆损伤机制的复位方法可以互补应用,结合使用,灵活变通,服务于临床,达到良好的复位效果。本文提出的三踝骨折逆移位机制手法复位方法为实现关节内骨折手法复位提供了新思路,逆移位机制值得进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] 张志刚. 踝关节骨折术中逆损伤机制手法复位钢板螺钉内固定术的临床效果[J]. 大家健康(学术版), 2014, 8(2): 181.
- [2] 宋会军, 王玉良. 踝关节骨折手术治疗分析[J]. 基层医学论坛, 2010, 14(2): 6.
- [3] GOLANÓ PI, VEGA J, LEEUW PA, et al. Anatomy of the ankle ligaments: A pictorial essay [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2010, 18(5): 557-569.
- [4] IMHAUSER CW, SIEGLER S, UDUPA JK, et al. Subject-specific models of the hindfoot reveal a relationship between morphology and passive mechanical properties [J]. J Biomech, 2007, 41(6): 1341-1349.
- [5] FUNK JR, HALL GW, CRANDALL JR, et al. Linear and quasi-linear viscoelastic characterization of ankle ligaments [J]. J Biomech Eng, 2000, 122(1): 15-22.
- [6] RHO JY, ASHMAN RB, TURNER CH. Young's modulus of trabecular and cortical bone material: Ultrasonic and microtensile measurements [J]. J Biomech, 1993, 26(2): 111-119.
- [7] 刘冠辉. 骨组织力学特性和重建的数值模拟及分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [8] PARR WC, CHAMOLI U, JONES A. Finite element micro-modelling of a human ankle bone reveals the importance of the trabecular network to mechanical performance: New methods for the generation and comparison of 3D models [J]. J Biomech, 2012, 46(1): 200-205.
- [9] 张禹, 刘志成, 成永忠, 等. 旋后外旋型踝关节损伤有限元模型的建立与力学分析[J]. 医用生物力学, 2012, 27(3): 282-288.

- ZHANG Y, LIU ZC, CHENG YZ, *et al.* Finite element modeling and mechanical analysis on supination-external rotation ankle injury [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(3): 282-288.
- [10] 成永忠, 赵继阳, 温建民, 等. 正骨手法配合三维骨科牵引固定架固定治疗三踝骨折疗效观察[J]. *辽宁中医药大学学报*, 2012, 14(2): 40-42.
- [11] 成永忠, 温建民, 马少云, 等. 三踝骨折的独立分型[J]. *中国骨伤*, 2005, 18(8): 483-486.
- [12] 成永忠, 赵继阳, 温建民, 等. 三踝骨折独立分型有限元分析及其在外固定架治疗三踝骨折中的应用初探[J]. *中国中医基础医学杂志*, 2011, 17(5): 575-587.
- [13] 赵继阳, 成永忠, 温建民, 等. 基于筋束骨理论的旋前-外旋型三踝骨折有限元分析[J]. *中国中医基础医学杂志*, 2012, 18(3): 328-329.
- [14] CHEN C, CHENG YZ, CHENG H, *et al.* Finite element analysis of the stress concentration [J]. *Int J Clin Exp Med*, 2017, 10(1): 276-284.

· 致读者 ·

## 医学论文中有关实验动物描述的要求

在医学论文的描述中,凡涉及到实验动物者,在描述中应符合以下要求:(1)品种、品系描述清楚;(2)强调来源;(3)遗传背景;(4)微生物学质量;(5)明确体质量;(6)明确等级;(7)明确饲养环境和实验环境;(8)明确性别;(9)有无质量合格证;(10)有对饲养方式的描述(如饲养类型、营养水平、照明方式、温度、湿度要求);(11)所有动物数量准确;(12)详细描述动物的健康状况;(13)对实验动物的处理方式有单独清楚的交代;(14)全部有对照,部分可采用双因素方差分析。

本刊编辑部