

# 健脾活骨方治疗非创伤性股骨头坏死的 生物力学机制研究

李泰贤<sup>1</sup>, 李晓亮<sup>1</sup>, 赵继阳<sup>1</sup>, 李葵<sup>2</sup>, 何海军<sup>2</sup>, 陈黎明<sup>1</sup>, 赵万宁<sup>1</sup>, 许根荣<sup>1</sup>,  
董士宇<sup>1</sup>, 白晶<sup>1</sup>, 郭盛君<sup>1</sup>, 陈卫衡<sup>3</sup>

(1. 北京中医药大学第三附属医院, 北京 100029;

2. 中国中医科学院望京医院, 北京 100102;

3. 中医骨伤治疗与运动康复智能化教育部工程研究中心, 北京 100029)

**摘要** **目的:**探讨健脾活骨方治疗非创伤性股骨头坏死的生物力学机制。**方法:**选择 20 例单侧非创伤性股骨头坏死患者作为研究对象。男 7 例, 女 13 例; 左髋 8 例, 右髋 12 例; 年龄 21 ~ 58 岁, 中位数 48 岁; 国际骨微循环研究学会分期均为 II 期。所有患者均采用口服健脾活骨方和药物动脉灌注治疗, 健脾活骨方每日 1 剂, 共服用 180 d; 药物动脉灌注共治疗 1 次。分别于治疗开始前、治疗开始后 3 个月及治疗开始后 1 年进行 CT 扫描, 建立股骨近端和坏死骨三维有限元模型, 测定股骨头负重区与坏死骨的最大总形变量和最大等效应力。**结果:**①股骨头负重区最大总形变量和最大等效应力。治疗开始前、治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年, 股骨头负重区最大总形变量比较, 差异有统计学意义 [ (4.101 ± 1.341) mm, (3.296 ± 1.203) mm, (3.356 ± 1.022) mm,  $F=5.646, P=0.008$  ]。治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年股骨头负重区最大总形变量均较治疗开始前减小 ( $P=0.036, P=0.007$ ); 治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年股骨头负重区最大总形变量的差异无统计学意义 ( $P=0.576$ )。治疗开始前、治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年, 股骨头负重区最大等效应力比较, 差异无统计学意义 [ (1.837 ± 0.804) MPa, (1.717 ± 0.649) MPa, (1.586 ± 0.593) MPa,  $F=1.145, P=0.332$  ]。②坏死骨最大总形变量和最大等效应力。治疗开始前、治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年, 坏死骨最大总形变量和最大等效应力总体比较, 差异有统计学意义 [ 最大总形变量: (3.963 ± 1.302) mm, (3.157 ± 1.126) mm, (3.202 ± 1.012) mm,  $F=5.930, P=0.007$ ; 最大等效应力: (1.246 ± 0.445) MPa, (1.470 ± 0.601) MPa, (1.323 ± 0.433) MPa,  $F=4.224, P=0.024$  ]。治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年坏死骨最大总形变量均较治疗开始前减小 ( $P=0.032, P=0.008$ ); 治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年坏死骨最大总形变量的差异无统计学意义 ( $P=0.517$ )。治疗开始后 3 个月坏死骨最大等效应力较治疗开始前增大 ( $P=0.030$ ), 治疗开始后 1 年与治疗开始前坏死骨最大等效应力的差异无统计学意义 ( $P=0.076$ ); 治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年坏死骨最大等效应力的差异无统计学意义 ( $P=0.202$ )。**结论:**健脾活骨方治疗非创伤性股骨头坏死的生物力学机制, 可能是通过增强坏死骨的强度与刚度, 使坏死骨可以提供有效支撑, 减轻股骨头负重区的应力集中现象、解除坏死骨区域正常骨组织高应力状态, 从而起到治疗作用。

**关键词** 股骨头坏死; 健脾活骨方; 限定因素分析; 生物力学现象

## Biomechanical mechanism of Jianpi Huogu Fang (健脾活骨方) in treatment of non-traumatic osteonecrosis of the femoral head

LI Taixian<sup>1</sup>, LI Xiaoliang<sup>1</sup>, ZHAO Jiyang<sup>1</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, HE Haijun<sup>2</sup>, CHEN Liming<sup>1</sup>, ZHAO Wanning<sup>1</sup>, XU Genrong<sup>1</sup>,  
DONG Shiyu<sup>1</sup>, BAI Jing<sup>1</sup>, GUO Shengjun<sup>1</sup>, CHEN Weiheng<sup>3</sup>

1. Beijing University of Chinese Medicine Third Affiliated Hospital, Beijing 100029, China

2. Wangjing Hospital of CACMS, Beijing 100102, China

3. Engineering Research Center of Chinese Orthopaedic and Sports Rehabilitation Artificial Intelligent, Ministry of Education, Beijing 100029, China

基金项目: 国家自然科学基金项目 (82030122, 81373801, 81973888); 北京市自然科学基金项目 (7182186); 北京中医药大学新教师启动基金项目 (2022-JYB-XJSJJ-085); 北京中医药大学科研平台建设项目 (2023-JYB-KYPT-03); 北京中医药大学中医骨伤治疗与运动康复智能化教育部工程研究中心培育项目 (BZYSY-2022-GCYJZXQX-07)

通讯作者: 陈卫衡 E-mail: drchenweiheng@163.com

**ABSTRACT Objective:** To explore the biomechanical mechanism of Jianpi Huogu Fang (健脾活骨方, JPHGF) in treatment of non-traumatic osteonecrosis of the femoral head (NONFH). **Methods:** Twenty patients with unilateral NONFH were selected as the subjects. The patients consisted of 7 males and 13 females ranged in age from 21 to 58 years (Median = 48 years). The ONFH located in left side for 8 patients, right for 12 ones, and belonged to stage II according to the staging standard issued by the Association Research Circulation Osseous (ARCO). All patients were treated with oral application of JPHGF, one dose a day for consecutive 180 days, and with arterial perfusion of normal saline and salvia miltiorrhiza injection in turn for one time. Furthermore, CT scans were conducted before the beginning of the treatment, at 3 and 12 months after the beginning of the treatment, respectively. Based on the CT scanning data, a three-dimensional (3D) finite element model of the proximal femur and necrotic bone was established, respectively, to measure the maximum total deformation (MTD) and maximum equivalent stress (MES) in the load-bearing area of femoral head and necrotic bone. **Results:** ① The MTD and MES in the load-bearing area of femoral head. The difference was statistically significant in MTD in the load-bearing area of femoral head among the 3 time-points ( $4.101 \pm 1.341, 3.296 \pm 1.203, 3.356 \pm 1.022$  mm,  $F = 5.646, P = 0.008$ ). The MTD in the load-bearing area of femoral head decreased at 3 and 12 months after the beginning of the treatment compared to pretreatment ( $P = 0.036, P = 0.007$ ), while, the comparison between the 3 and 12 months after the beginning of the treatment revealed no significant difference ( $P = 0.576$ ). However, the difference was not statistically significant in MES in the load-bearing area of femoral head among the 3 timepoints ( $1.837 \pm 0.804, 1.717 \pm 0.649, 1.586 \pm 0.593$  MPa,  $F = 1.145, P = 0.332$ ). ② The MTD and MES in the necrotic bone. The difference was statistically significant in MTD and MES in the necrotic bone among the 3 timepoints in general (MTD:  $3.963 \pm 1.302, 3.157 \pm 1.126, 3.202 \pm 1.012$  mm,  $F = 5.930, P = 0.007$ ; MES:  $1.246 \pm 0.445, 1.470 \pm 0.601, 1.323 \pm 0.433$  MPa,  $F = 4.224, P = 0.024$ ). The MTD in the necrotic bone decreased at 3 and 12 months after the beginning of the treatment compared to pretreatment ( $P = 0.032, P = 0.008$ ), while, the comparison between 3 and 12 months after the beginning of the treatment revealed no significant difference ( $P = 0.517$ ). The MES in the necrotic bone increased at 3 months after the beginning of the treatment compared to pretreatment ( $P = 0.030$ ), while, the comparisons between the 12 months after the beginning of the treatment and before the beginning of the treatment, as well as between the 3 and 12 months after the beginning of the treatment revealed no significant difference ( $P = 0.076, P = 0.202$ ). **Conclusion:** The JPHGF may work by making the necrotic bone to provide effective support through enhancing its strength and stiffness, which can reduce the stress concentration in the load-bearing area of femoral head, and relieve the high-stress state of the normal bone tissue in the area of necrotic bone, thereby achieving the therapeutic effects for NONFH. **Keywords** femur head necrosis; Jianpi Huogu Fang; finite element analysis; biomechanical phenomena

股骨头坏死的发病率较高<sup>[1-2]</sup>, 其中非创伤性股骨头坏死的发病率远高于创伤性股骨头坏死<sup>[3]</sup>。因此, 如何有效治疗非创伤性股骨头坏死、防止股骨头塌陷、避免年轻患者过早接受关节置换治疗具有重要价值。课题组前期研究发现, 健脾活骨方与髓芯减压病灶清除植骨术治疗早中期非创伤性股骨头坏死的影像稳定率相当(二者影像稳定率均高于 70%), 而且在改善症状与功能方面健脾活骨方的治疗效果更佳<sup>[4-5]</sup>。为明确健脾活骨方治疗非创伤性股骨头坏死的生物力学机制, 我们通过有限元分析方法进行了此次研究, 现总结报告如下。

## 1 临床资料

### 1.1 研究对象

以 2018 年 6 月至 2022 年 6 月在中国中医科学院望京医院住院治疗的非创伤性股骨头坏死患者为研究对象。试验方案经中国中医科学院望京医院医学伦理委员会审查通过, 伦理批件号: WJEC-KT-2016-

008-P002。

### 1.2 诊断标准

采用《中国成人股骨头坏死临床诊疗指南(2020)》中股骨头坏死的诊断标准<sup>[6]</sup>。

### 1.3 纳入标准

①符合上述股骨头坏死诊断标准; ②国际骨微循环研究学会分期为 II 期<sup>[7]</sup>; ③单侧股骨头坏死; ④中医辨证分型为瘀瘀阻络证<sup>[8]</sup>; ⑤同意参与本研究, 签署知情同意书。

### 1.4 排除标准

①有髋关节感染病史者; ②有髋部创伤史者。

### 1.5 退出标准

①试验期间发生髋关节创伤、使用激素及大量饮酒者; ②治疗开始后 1 年内发生股骨头塌陷者<sup>[4]</sup>。

## 2 方 法

### 2.1 治疗方法

所有患者均采用口服健脾活骨方和药物动脉灌

注治疗。健脾活骨方药物组成为党参片 20 g、白术 12 g、桂枝 10 g、赤芍 10 g、茯苓 15 g、法半夏 10 g、当归 10 g、熟地黄 20 g、川芎 10 g、甘草片 6 g。上述药物水煎服,每日 1 剂,分 2 次服用,共服用 180 d。药物动脉灌注治疗,采用 Seldinger 穿刺技术,经股动脉插管至患侧旋股内、外侧动脉,依次快速注入生理盐水 100 mL、丹参注射液 30 mL,共治疗 1 次。同时拄拐保护 6 个月,并辅以非负重状态下功能锻炼。

## 2.2 有限元分析方法

**2.2.1 CT 扫描** 分别于治疗开始前、治疗开始后 3 个月及治疗开始后 1 年采用 GE Bright speed 16 排螺旋 CT 进行髋关节扫描。扫描参数:电压 120 kV,电流 244.80 mAs,像素尺寸 0.84 mm,扫描架倾斜角度 0°,骨组织窗,层厚 1.25 mm,层间距 0.625 mm。获得的图像原始数据以 DICOM3.0 格式保存。

**2.2.2 有限元模型建立** 图像处理采用联想 P510 图形塔式工作站。将获得的 DICOM3.0 格式的髋关节 CT 图像导入 Mimics16.0 图像处理软件,基于 CT 灰度值进行阈值分割,修剪蒙板,擦除噪点,填充目标区域,建立股骨近端和坏死骨三维模型。将三维模型导入 Geomagic Studio2012 逆向工程软件进行三维模型表面润滑,通过布尔运算将股骨近端与坏死骨作减

法运算,得到不包括坏死骨的股骨近端三维模型和坏死骨三维模型,再将模型导入 ANSYS Mechanical APDL 进行网格划分。见图 1。

**2.2.3 材料赋值与力学加载** 参考前期研究结果<sup>[9]</sup>,根据 CT 灰度值赋值,其中坏死骨赋予 10 级材料属性、股骨近端赋予 30 级材料属性<sup>[10-11]</sup> [图 2(1)、图 2(2)]。参考 Brown 等<sup>[12]</sup>的研究结果设置股骨头负重区,此区域在冠状位中向股骨头中心的弧度为 40°、在矢状位中向股骨头中心的弧度为 80°。设置股骨颈 15°前倾、股骨近端模型的远端截面为全约束进行固定 [图 2(3)],将体重的 2.5 倍作为步行时的髋关节压力进行力学加载<sup>[13]</sup> [图 2(4)、图 2(5)]。测定股骨头负重区与坏死骨的最大总形变量和最大等效应力。

## 2.3 数据统计方法

采用 SPSS22.0 软件进行数据统计分析。不同时间点股骨头负重区、坏死骨最大总形变量和最大等效应力的总体比较均采用单因素方差分析,同一指标不同时间点两两比较均采用  $q$  检验。检验水准  $\alpha = 0.05$ 。

## 3 结果

### 3.1 一般资料

共纳入 20 例(20 髋)非创伤性股骨头坏死患者。

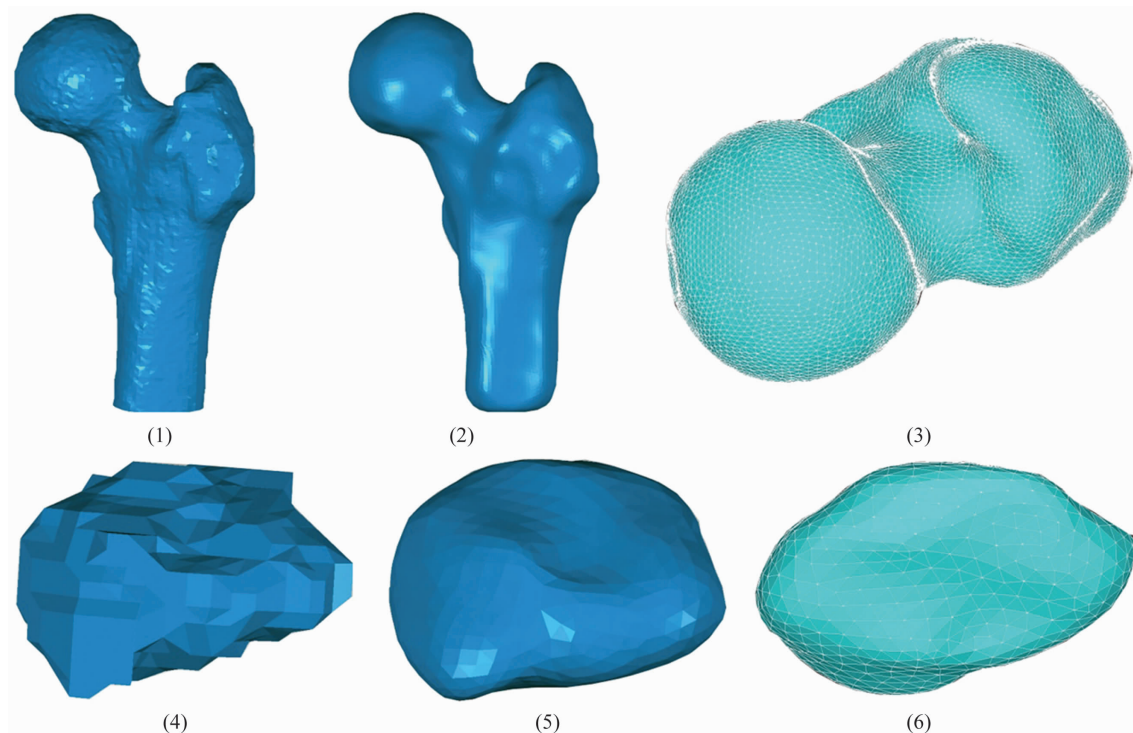


图 1 非创伤性股骨头坏死有限元模型

注:(1)(2)(3)分别为股骨近端三维模型、润滑后的三维模型及网格化后的三维模型,(4)(5)(6)分别为坏死骨三维模型、润滑后的三维模型及网格化后的三维模型。

男 7 例,女 13 例;左髌 8 例,右髌 12 例;年龄 21 ~ 58 岁,中位数 48 岁。

### 3.2 有限元分析结果

#### 3.2.1 股骨头负重区最大总形变量和最大等效应力

治疗开始后随时间延长,股骨头负重区形变量逐渐减小。治疗开始前股骨头负重区应力集中现象明显,股骨头内压应力分散于股骨头与股骨颈交界处;治疗开始后股骨头负重区应力集中现象较治疗前减轻,股骨头内压应力逐渐集中于股骨距。治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年股骨头负重区最大总形变量均较治疗开始前减小( $P=0.036, P=0.007$ );治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年股骨头负重区最大总形变量的差异无统计学意义( $P=0.576$ )。治疗开始前、治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年,股骨头负重区最大等效应力比较,差异无统计学意义。见图 3、表 1。

**3.2.2 坏死骨最大总形变量和最大等效应力** 治疗开始后坏死骨形变量较治疗开始前明显减小,应力集中现象较治疗开始前减轻。治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年坏死骨最大总形变量均较治疗开始前减小( $P=0.032, P=0.008$ );治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年坏死骨最大总形变量的差异无统计学

意义( $P=0.517$ )。治疗开始后 3 个月坏死骨最大等效应力较治疗开始前增大( $P=0.030$ ),治疗开始后 1 年与治疗开始前坏死骨最大等效应力的差异无统计学意义( $P=0.076$ );治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年坏死骨最大等效应力的差异无统计学意义( $P=0.202$ )。见图 4、表 2。

### 4 讨论

非创伤性股骨头坏死的发病率远高于创伤性股骨头坏死,且多为双侧发病,若因早期治疗不及时出现股骨头塌陷,将使髋关节产生不可逆的器质性损伤<sup>[14]</sup>。股骨头塌陷是因坏死骨无法提供有效支撑,坏死区域骨组织承受高应力,导致坏死区骨组织生物力学特性降低引起的应力性骨折<sup>[15]</sup>。此外,股骨头塌陷后股骨头形态改变会进一步加重负重区应力集中现象,使髋关节逐渐退变,发生髋骨关节炎<sup>[16-17]</sup>。因此,在非创伤性股骨头坏死还未发生塌陷时及时治疗,改善股骨头内血供、增强坏死骨骨质,防止应力集中是早期股骨头坏死的治疗目的<sup>[18]</sup>。由于非创伤性股骨头坏死的确切病机仍不完全清楚,目前尚无上市西药可用。中医治疗以整体观念、辨证论治为指导,在防治非创伤性股骨头坏死方面具有一定优势。

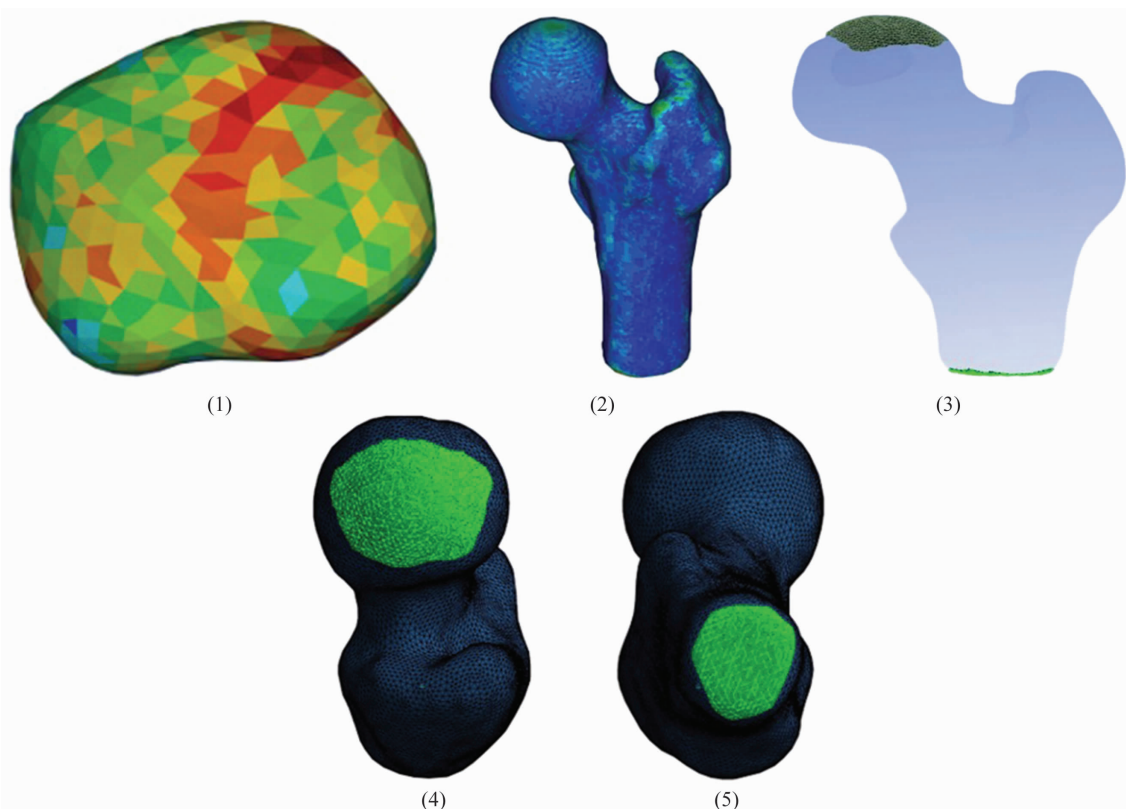


图 2 非创伤性股骨头坏死有限元模型材料赋值与力学加载



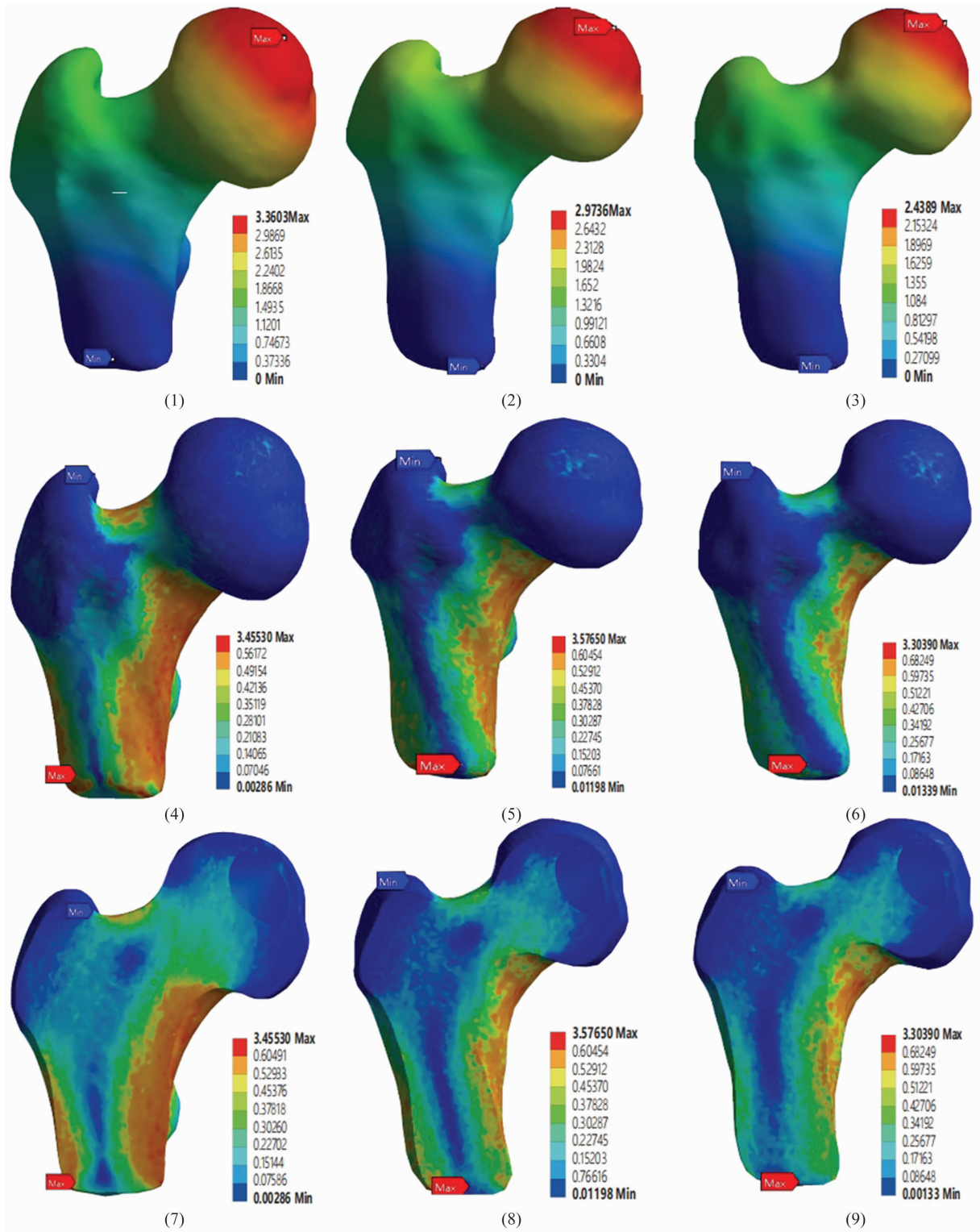


图3 股骨头负重区形变和应力分布有限元分析图

注:(1)(2)(3)分别为治疗开始前的形变分布整体图、应力分布整体图、应力分布剖面图,(4)(5)(6)分别为治疗开始后3个月的形变分布整体图、应力分布整体图、应力分布剖面图,(7)(8)(9)分别为治疗开始后1年的形变分布整体图、应力分布整体图、应力分布剖面图。

本研究测定的股骨头负重区和坏死骨的最大等效应力、最大总形变量与 Yuan 等<sup>[19-20]</sup>的研究结果相似。股骨头负重区有限元分析结果显示:治疗开始后

股骨头负重区形变量逐渐减小,负重区应力集中现象较治疗开始前减轻,股骨头内压应力逐渐集中于股骨距。治疗开始后3个月和治疗开始后1年,股骨头负

表 1 非创伤性股骨头坏死患者治疗前后股骨头负重区最大总形变量和最大等效应力

| 测定时间点      | 样本量/髋 | 最大总形变量/ $(\bar{x} \pm s, \text{mm})$ | 最大等效应力/ $(\bar{x} \pm s, \text{MPa})$ |
|------------|-------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 治疗开始前      | 20    | $4.101 \pm 1.341$                    | $1.837 \pm 0.804$                     |
| 治疗开始后 3 个月 | 20    | $3.296 \pm 1.203$                    | $1.717 \pm 0.649$                     |
| 治疗开始后 1 年  | 20    | $3.356 \pm 1.022$                    | $1.586 \pm 0.593$                     |
| <i>F</i> 值 |       | 5.646                                | 1.145                                 |
| <i>P</i> 值 |       | 0.008                                | 0.332                                 |

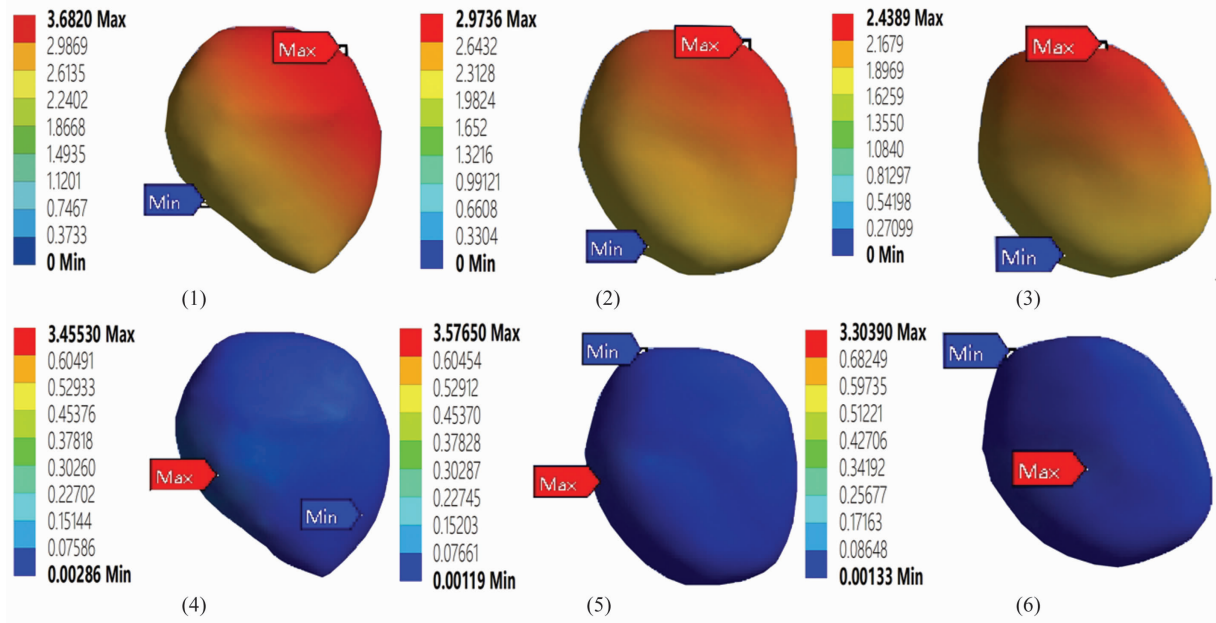


图 4 坏死骨形变和应力分布有限元分析图

注:(1)(2)(3)分别为治疗开始前、治疗开始后 3 个月及治疗开始后 1 年坏死骨形变分布有限元分析图,(4)(5)(6)分别为治疗开始前、治疗开始后 3 个月及治疗开始后 1 年坏死骨应力分布有限元分析图。

表 2 非创伤性股骨头坏死患者治疗前后坏死骨最大总形变量和最大等效应力

| 测定时间点      | 样本量/髋 | 最大总形变量/ $(\bar{x} \pm s, \text{mm})$ | 最大等效应力/ $(\bar{x} \pm s, \text{MPa})$ |
|------------|-------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 治疗开始前      | 20    | $3.963 \pm 1.302$                    | $1.246 \pm 0.445$                     |
| 治疗开始后 3 个月 | 20    | $3.157 \pm 1.126$                    | $1.470 \pm 0.601$                     |
| 治疗开始后 1 年  | 20    | $3.202 \pm 1.012$                    | $1.323 \pm 0.433$                     |
| <i>F</i> 值 |       | 5.930                                | 4.224                                 |
| <i>P</i> 值 |       | 0.007                                | 0.024                                 |

重区最大总形变量和最大等效应力较治疗开始前均有逐渐减小的趋势。这提示治疗后股骨头负重区应力集中现象和应力传导障碍情况好转,压应力逐渐沿负重区—坏死骨—股骨距向下传导,使股骨颈外侧承受的压应力减少,股骨力学传导机制逐渐恢复正常<sup>[20-21]</sup>;由于股骨头负重区应力集中现象缓解,负重区骨组织承受的应力与载荷也逐渐减小,股骨头负重区形变量也随之减小。坏死骨有限元分析结果显示:治疗开始后坏死骨形变量较治疗开始前明显减小,应力集中现象较治疗开始前减轻。治疗开始后 3 个月和治疗开始后 1 年坏死骨最大总形变量均较治疗开始前减小,治疗开始后 3 个月坏死骨最大等效应力较

治疗开始前增大。这提示治疗后坏死骨的生物力学性能逐渐恢复,可以起到一定的支撑作用,压应力恢复由负重区沿压力性骨小梁向下传导的路径,坏死骨承受的压应力随之增大;坏死骨生物力学特性逐渐恢复,其刚度与强度也逐渐增大,坏死骨形变量也随之减小。

课题组前期基础研究发现,健脾活骨方具有修复损伤血管,促进新骨生成,增强坏死骨强度与刚度等作用<sup>[22-24]</sup>。胡元斌等<sup>[25]</sup>的研究表明,加强负重区的支撑力可以减小股骨头内应力集中,从而有利于坏死骨修复,预防坏死骨塌陷。因此,我们认为健脾活骨方可通过改善股骨头内血供、促进新骨产生、修复坏死骨,恢复坏死骨生物力学特性,使坏死骨可以有效地

支撑负重区,改善负重区应力集中现象,避免股骨头坏死区域骨组织承受高应力,进而防止股骨头塌陷。

本研究的结果提示,健脾活骨方治疗非创伤性股骨头坏死的生物力学机制,可能是通过增强坏死骨的强度与刚度,使坏死骨可以提供有效支撑,减轻股骨头负重区的应力集中现象、解除坏死骨区域正常骨组织高应力状态,从而起到治疗作用。

### 参考文献

- [1] 章晓云,高振罡,陈锋,等. 激素性股骨头坏死风险模型构建及潜在的中药治疗预测[J]. 中国组织工程研究, 2023,27(28):4539-4545.
- [2] TAN B, LI W, ZENG P, et al. Epidemiological study based on china osteonecrosis of the femoral head database[J]. Orthop Surg, 2021,13(1):153-160.
- [3] LIU W, YUE J, GUO X, et al. Epidemiological investigation and diagnostic analysis of osteonecrosis of the femoral head in three northeastern provinces of China[J]. J Orthop Surg Res, 2024,19(1):292.
- [4] 陈卫衡,周宇,何海军,等. 健脾活骨方治疗早中期非创伤性股骨头坏死的前瞻性临床研究[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2013,7(3):287-293.
- [5] 陈卫衡,周宇,何海军,等. 健脾活骨方治疗早中期非创伤性股骨头坏死临床回顾性研究[J]. 中国中西医结合杂志, 2013,33(8):1054-1058.
- [6] 中国医师协会骨科医师分会骨循环与骨坏死专业委员会, 中华医学会骨科分会骨显微修复学组, 国际骨循环学会中国区. 中国成人股骨头坏死临床诊疗指南(2020)[J]. 中华骨科杂志, 2020,40(20):1365-1376.
- [7] YOON B H, MONT M A, KOO K H, et al. The 2019 revised version of Association Research Circulation Osseous staging system of osteonecrosis of the femoral head[J]. J Arthroplasty, 2020,35(4):933-940.
- [8] 中华中医药学会. 股骨头坏死中医辨证标准(2019 年版)[J]. 中医正骨, 2019,31(6):1-2.
- [9] 薛志鹏,李泰贤,李龚,等. 基于 CT 灰度值赋值的股骨头坏死有限元模型对比[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(3):395-400.
- [10] ZHANG Z, LIN T, ZHONG Y, et al. Effect of femoral head necrosis cystic area on femoral head collapse and stress distribution in femoral head: a clinical and finite element study[J]. Open Med(Wars), 2022,17(1):1282-1291.
- [11] WEN M T, LIANG X Z, LUO D, et al. The effect of the hip flexion angle in osteonecrosis of the femoral head based on China-Japan friendship hospital classification—a finite element study[J]. Orthop Surg, 2023,15(10):2689-2700.
- [12] BROWN T D, PEDERSEN D R, BAKER K J, et al. Mechanical consequences of core drilling and bone-grafting on osteonecrosis of the femoral head[J]. J Bone Joint Surg Am, 1993,75(9):1358-1367.
- [13] VAN DEN BOGERT A J, READ L, NIGG B M. An analysis of hip joint loading during walking, running, and skiing[J]. Med Sci Sports Exerc, 1999,31(1):131-142.
- [14] 庄至坤,郭金花,赵岩,等. 股骨头坏死髋关节疼痛和活动度与 ARCO 分期的相关性分析[J]. 中医正骨, 2020, 32(1):21-24.
- [15] 魏秋实,李子祺,袁颖嘉,等. “标本兼治”理论在股骨头坏死中医药治疗中的指导作用[J]. 中医正骨, 2020, 32(1):56-59.
- [16] 陆舜,林天烨,何敏聪,等. 基于前外侧保留角预测股骨头坏死塌陷的有限元分析[J]. 中国修复重建外科杂志, 2023,37(11):1394-1402.
- [17] 郭邵逸,邓旺,邵宏翊,等. 改良髓芯减压技术治疗股骨头缺血性坏死的疗效及其影响因素分析[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2023,16(6):523-530.
- [18] 李伯瑞,赵德伟,覃开蓉,等. 带血管蒂髂骨瓣移植治疗股骨头缺血性坏死填充位置的有限元分析[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2021,14(4):272-277.
- [19] YUAN D, WU Z, YANG L, et al. Biomechanical analysis of the drilling parameters for early osteonecrosis of the femoral head[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2022, 219: 106737.
- [20] 杨挺,郑建河,姚子龙,等. 行走中股骨生物力学特性的有限元分析[J]. 广东医学, 2016,37(4):512-515.
- [21] 凌观汉,李永斌,潘学文,等. 中日友好医院分型股骨头坏死腓骨植入治疗的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2020,24(18):2817-2822.
- [22] 徐腾腾,王金霞,明瑞蕊,等. 健脾活骨方对糖皮质激素致血管内皮细胞功能损伤的干预作用[J]. 中国中药杂志, 2022,47(6):1625-1631.
- [23] 万蓉,林诗富,林娜,等. 不同治法方药对激素性股骨头坏死的骨组织形态学影响[J]. 中国骨伤, 2010,23(12): 915-919.
- [24] 孔祥英,万蓉,李莉,等. 不同治法方药对激素性股骨头坏死鸡成骨相关因子的影响[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(5):614-617.
- [25] 胡元斌,周岳来,李永顺,等. 有限元分析髓芯减压并同种异体植骨治疗股骨头缺血性坏死的生物力学改变[J]. 中国医学物理学杂志, 2020,37(2):243-248.

(收稿日期:2024-05-25 本文编辑:李晓乐)