

骨水泥量及分布对椎体成形术后相邻椎体生物力学影响的三维有限元分析

卢昌怀 刘志军* 张宏波 常峥 王瑜 周伟平

湖南常德市第一中医医院骨伤科脊柱病区 415000

中图分类号: R683.2 文献标识码: A 文章编号: 1006-7108(2015) 01-0029-05

摘要: 目的 利用三维有限元分析骨水泥量及分布对相邻椎体生物力学的影响。方法 通过 CT 数据,利用 Mimics10.0、Geomagic studio 11.0、HyperMesh 11.0、Abaqus 6.9 有限元分析软件,建立骨质疏松性椎体模型,根据骨水泥量及分布方式建成有限元模型,施加载荷,测量相邻椎体应力分布变化情况。**结果** 垂直载荷下,T12 椎体皮质骨等效应力在单侧 2 ml 骨水泥灌注中较高为 29.49 MPa;下终板所受应力在单侧偏中 4 ml 骨水泥灌注中较高为 3.93 MPa。L2 皮质骨等效应力在单侧骨水泥灌注较高为 15.29 MPa;上终板所受应力在单侧偏中 2 ml 骨水泥灌注中较高为 4.53 MPa。侧屈载荷下,T12 椎体皮质骨所受等效应力在单侧偏中 4 ml 骨水泥灌注较高 114.83 MPa;下终板所受应力在双侧骨水泥 4 ml 灌注中较高为 8.62 MPa。L2 椎体皮质骨所受等效应力在单侧偏中 4 ml 骨水泥中较高为 96.41 MPa;上终板所受应力在单侧偏中 4 ml 骨水泥灌注中较高为 9.80 MPa。旋转载荷下,T12 椎体皮质骨所受等效应力在单侧 2 ml 骨水泥灌注中较高为 119.42 MPa;下终板所受应力在单侧 2 ml 骨水泥灌注中较高为 8.77 MPa。L2 椎体皮质骨所受等效应力在单侧 2 ml 骨水泥灌注中较高为 146.31 MPa;L2 上终板所受应力在单侧 2 ml 骨水泥灌注中较高为 7.84 MPa。**结论** 骨水泥量及分布是相邻椎体发生骨折的一个重要因素,但与椎体所受力学载荷方向也密切相关。

关键词: 椎体成形术;骨水泥;有限元分析;生物力学

Effect of the volume and distribution of bone cement on the adjacent vertebrae after vertebroplasty: A finite analysis

LU Changhuai, LIU Zhijun, ZHANG Hongbo, Chang Zheng, Wang Yu, Zhou Weiping

Department of Orthopedics and Traumatology, the First Hospital of Traditional Chinese Medicine in Changde, Changde 415000, China

Corresponding author: LIU Zhijun, Email: 5331318@qq.com

Abstract: Objective To analyze the biomechanical effect of the volume and distribution of bone cement on the adjacent vertebrae using 3D finite analysis. **Methods** Using Mimics 10.0, Geomagic studio 11.0, HyperMesh 11.0, and Abaqus 6.9 softwares, a geometric reconstruction of the vertebral body was developed using the CT 3D reconstruction data. The finite model was established according to the volume and distribution of bone cement. The loading was performed to investigate the force distribution of the adjacent vertebrae. **Results** Under the vertical loading, the von Mises stress on the cortical bone of T12 was 29.49 MPa in the unilateral 2 ml bone cement perfusion. The von Mises stress on the lower endplate was higher to 3.93 MPa in the unilateral across the midline 2 ml bone cement perfusion. The von Mises stress on cortical bone of L2 was 15.29 MPa in the unilateral bone cement perfusion. The von Mises stress on the upper endplate was 4.53 MPa in the unilateral across the midline 2 ml bone cement perfusion. Under the lateral bending load, the von Mises stress on cortical bone of T12 was 114.83 MPa in the unilateral across the midline 4 ml bone cement perfusion. The von Mises stress on the lower endplate was 8.62 MPa in the bipedicular 4 ml bone cement perfusion. The von Mises stress on cortical bone of L2 was 96.41 MPa in the unilateral across the midline 4 ml bone cement perfusion. The von Mises stress on the upper endplate was 9.80 MPa in the unilateral across the midline 4 ml bone cement perfusion. Under the rotating load, the von Mises stress on cortical bone of T12 was 119.42 MPa in the unilateral

2 ml bone cement perfusion. The von Mises stress on the lower endplate was 8.77 MPa in the unilateral 2ml bone cement perfusion. The von Mises stress on cortical bone of L2 was 146.31MPa MPa in the unilateral 2 ml bone cement perfusion. The von Mises stress on the upper endplate was 7.84 MPa in the unilateral 2 ml bone cement perfusion. **Conclusion** The volume and distribution of bone cement are the most important determinant in adjacent vertebrae fractures. The direction of the mechanical loading is also closely related.

Key words: Vertebroplasty; Bone cement; Finite element analysis; Biomechanics

对于老年人骨质疏松性椎体压缩性骨折的治疗,传统非手术治疗有时不能阻止椎体后凸畸形的进程;因为骨的质量差,开放手术行内固定受到限制。尽管经皮椎体成形术存在诸多争议,但是还是用来治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折。经皮椎体成形术不但能减轻疼痛,还能增加椎体强度,使患者早期活动。当然椎体成形术也存在一系列并发症,如骨水泥渗漏、相邻椎体骨折等。有研究表明在行椎体成形术的患者中,一年内近 20% 的患者发生椎体骨折,且 50% - 67% 的是发生在相邻椎体^[1-3]。尽管椎体成形术后相邻椎体骨折的生物力学研究并不完善,但普遍认为骨水泥是相邻椎体骨折的重要决定因素。Berlemann 等认为骨水泥灌注后椎体刚度的改变影响力学传导^[4]。有学者认为椎体行骨水泥灌注后将减弱终板的缓冲功能,没有行骨水泥灌注的椎体椎间盘及终板应力增加,而这将导致没有行骨水泥灌注椎体骨折的风险增加^[5, 6]。

与传统的尸体标本研究相比,有限元在脊柱生物力学研究的应用越来越广泛,其具有成本低,耗时短等优点。本研究通过建立骨质疏松性椎体压缩性骨折经皮椎体成形术的模型,通过对术后相邻椎体生物力学研究,说明骨水泥量及在椎体内的分布对相邻椎体的生物力学影响程度。

1 材料与方 法

1.1 有限元模型的建立

对成人正常胸腰椎进行 CT 扫描(使用 64 排西门子螺旋 CT,层厚 0.625 mm),数据以 DICOM 格式储存。然后导入 Mimics10.0 软件,根据不同组织灰度值的差异,通过阈值化及相应的擦除操作,构建得到 T11-L3 三维模型,将模型输出为 STL 文件,再导入逆向工程软件 Geomagic Studio11.0 进行光滑处理,拟合曲面,输出为 Iges 文件。再导入 Hypermesh11.0 软件中进行网格划分及赋值,减少正常椎体皮质骨、松质骨、终板的弹性模量,建成骨质疏松椎体模型(图 1)。根据穿刺方式及注入的骨水泥量,在 L1 椎体内生成相应大小的骨水泥单元,建成六组模型(图 1):A:单侧(2 ml):骨水泥限于椎

体一侧;B:单侧偏中(2 ml):骨水泥越过椎体中线;C:双侧(4 ml):骨水泥分布于椎体两侧;D:单侧(4 ml):骨水泥限于椎体一侧;E:单侧偏中(4 ml):骨水泥越过椎体中线;F:双侧(8 ml):骨水泥分布于椎体两侧。最后导入 Abaqus6.9 软件进行后处理。

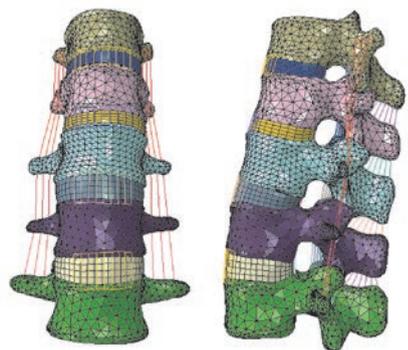


图 1 三维有限元模型

Fig. 1 The 3-D finite element model

1.2 材料参数

骨性结构、椎间盘及骨水泥均模拟为各向同性的线弹性材料,材料特性由以往文献确定^[7]。

表 1 有限元模型各结构材料参数

Table 1 Material property of the different tissue in the finite element model

	弹性模量(MPa)	泊松比
皮质骨	8040(正常 12000)	0.3
松质骨	34(正常 100)	0.2
终板	670(正常 1000)	0.4
髓核	0.2	0.4999
纤维环	350 - 500	0.45
骨水泥	500 - 3000	0.41

1.3 模型加载及有限元分析

模拟 5 种状态:站立、屈曲、后伸、侧屈及旋转。站立时模型给予轴向压缩加载实验,加载条件为 500 N(模拟生理状态下的重力作用),沿垂直方向。屈曲时对模型施加 1175 N 轴向载荷及 7.5 Nm 的力矩。后伸、侧屈及旋转时对模型施加 500 N 轴向载荷及 7.5 Nm 扭矩。载荷施加于 T11 椎体上面,L3 椎体下面约束。等效应力云图显示相邻椎体、终板

等效应力分布情况。

2 结果

建立骨质疏松性椎体骨折椎体成形术三维有限元模型, 整个模型共有 71894 个单元, 26369 个节点。模型分析结果与以往研究具有相似性^[8, 9], 认为模型有效, 可以用来进一步分析计算。

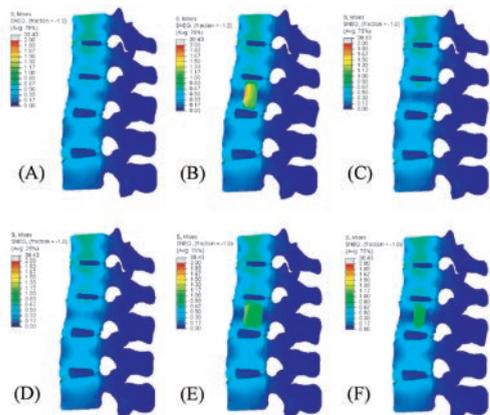


图 2 垂直载荷下各模型等效应力云图(A:单侧(2 ml); B:单侧偏中(2 ml); C:双侧(4 ml); D:单侧(4 ml); E:单侧偏中(4 ml); F:双侧(8 ml))

Fig. 2 The von Mises stress under the standing load. A: unipedicular (2 ml); B: unipedicular across the midline (2 ml); C: bipedicular(4 ml); D: unipedicular (4 ml); E: unipedicular across the midline (4 ml); F: bipedicular (8 ml)

垂直载荷下, T12 皮质骨在六种模型中所受最高等效应力分别为 29.49 MPa、29.47 MPa、29.45 MPa、29.48 MPa、29.45 MPa、29.43 MPa。椎体皮质骨所受等效应力在双侧骨水泥灌注中较小, 单侧骨水泥灌注较高; T12 下终板在六种模型中所受最高等效应力分别为 3.86 MPa、3.90 MPa、3.84 MPa、3.89 MPa、3.93 MPa、3.86 MPa, 下终板所受应力在单侧偏中骨水泥灌注中较高。L2 在六种模型中所受最高等效应力分别为 15.29 MPa、15.27 MPa、15.27 MPa、15.29 MPa、15.26 MPa、15.26 MPa。椎体皮质骨所受等效应力在单侧偏中及双侧骨水泥灌注中较小, 单侧骨水泥灌注较高; L2 上终板在六种模型中所受最高等效应力分别为 4.45 MPa、4.53 MPa、4.45 MPa、4.50 MPa、4.50 MPa、4.49 MPa, 上终板所受应力在单侧偏中骨水泥灌注中较高。

侧屈载荷下, T12 皮质骨在六种模型中所受最高等效应力分别为 114.55 MPa、114.76 MPa、114.64 MPa、114.60 MPa、114.83 MPa、114.73 MPa。

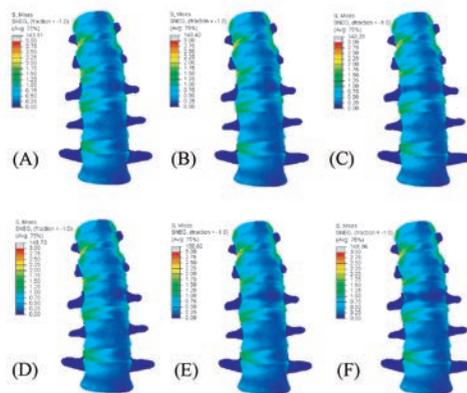


图 3 侧屈载荷下各模型等效应力云图(A:单侧(2 ml); B:单侧偏中(2 ml); C:双侧(4 ml); D:单侧(4 ml); E:单侧偏中(4 ml); F:双侧(8 ml))

Fig. 3 The von Mises stress under the lateral bending load. A: unipedicular (2 ml); B: unipedicular across the midline (2 ml); C: bipedicular(4 ml); D: unipedicular (4 ml); E: unipedicular across the midline (4 ml); F: bipedicular (8 ml).

椎体皮质骨所受等效应力在单侧骨水泥灌注中较小, 单侧偏中骨水泥灌注等效应力较高; T12 下终板在六种模型中所受最高等效应力分别为 8.30 MPa、8.37 MPa、8.55 MPa、8.29 MPa、8.44 MPa、8.62 MPa, 下终板所受应力在双侧骨水泥灌注中较高。L2 皮质骨在六种模型中所受最高等效应力分别为 96.34 MPa、96.39 MPa、96.36 MPa、96.37 MPa、96.41 MPa、93.37 MPa。椎体皮质骨所受等效应力在单侧偏中及双侧骨水泥灌注中较高, 单侧骨水泥灌注较低; L2 上终板在六种模型中所受最高等效应力分别为 9.73 MPa、9.78 MPa、9.74 MPa、9.78 MPa、9.80 MPa、9.78 MPa, 上终板所受应力在单侧偏中骨水泥灌注中较高。

旋转载荷下, T12 皮质骨在六种模型中所受最高等效应力分别为 119.42 MPa、115.83 MPa、117.99 MPa、115.94 MPa、115.28 MPa、114.34 MPa。椎体皮质骨所受等效应力在单侧骨水泥灌注中较高, 单侧偏中 4 ml 及双侧 4 ml 骨水泥灌注等效应力较低; T12 下终板在六种模型中所受最高等效应力分别为 8.77 MPa、8.69 MPa、8.70 MPa、8.70 MPa、8.71 MPa、8.62 MPa, 下终板所受应力在单侧 2 ml 及单侧偏中 4 ml 骨水泥灌注中较高。L2 皮质骨在六种模型中所受最高等效应力分别为 146.31 MPa、145.85 MPa、146.21 MPa、145.93 MPa、145.82 MPa、145.81 MPa。椎体皮质骨所受等效应力在单侧 2 ml

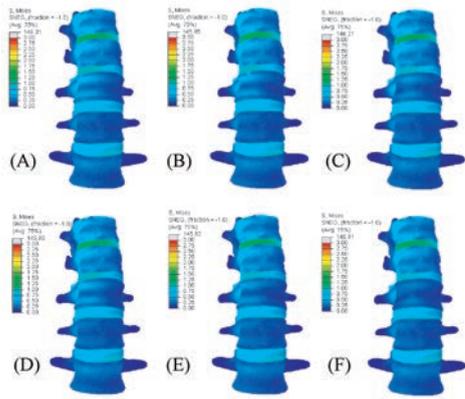


图4 旋转载荷下各模型等效应力云图(A:单侧(2 ml);B:单侧偏中(2 ml);C:双侧(4 ml);D:单侧(4 ml);E:单侧偏中(4 ml);F:双侧(8 ml))

Fig. 4 The von Mises stress under the rotating load. A: unipedicular (2 ml); B: unipedicular across the midline (2 ml); C: bipedicular(4 ml); D: unipedicular (4 ml); E: unipedicular across the midline (4 ml); F: bipedicular (8 ml).

及双侧 4 ml 骨水泥灌注中较高;L2 上终板在六种模型中所受最高等效应力分别为 7.84 MPa、7.68 MPa、7.83 MPa、7.70 MPa、7.67 MPa、7.68 MPa,上终板所受应力在单侧偏中骨水泥灌注中较低。

3 讨论

经皮椎体成形术用来治疗老年骨质疏松性椎体压缩性骨折越来越广泛,与其相关的生物力学研究也受到众多生物力学专家的关注。随着医学影像技术和计算机科学的发展,有限元分析作为一种较新的生物力学研究手段,逐渐应用到脊柱生物力学领域。有限元法具有实验耗时短、费用少、可模拟复杂工况及可重复等优点。利用有限元软件的建模及力学分析功能,可以精确地建立椎体、椎间盘及韧带等组织的三维模型,并能够赋予对应生物力学材料参数,模拟各种生物力学载荷,可以求解不同载荷下应力、应变分布等情况。

在本研究中,不同载荷下,椎体成形术后相邻椎体等效应力作为研究指标,研究发现骨水泥量及在椎体内的分布对相邻椎体的生物力学有影响。垂直载荷下,T12 椎体皮质骨等效应力在单侧骨水泥灌注中为 29.49 MPa(单侧 2 ml)、29.47 MPa(单侧偏中 2 ml)、29.48 MPa(单侧 4 ml),均高于双侧骨水泥灌注;T12 下终板所受应力在单侧偏中 4 ml 骨水泥灌注中较高为 3.93 MPa。L2 皮质骨等效应力在

单侧骨水泥灌注较高为 15.29 MPa;L2 上终板所受应力在单侧偏中 2 ml 骨水泥灌注中较高为 4.53 MPa。侧屈载荷下,T12 椎体皮质骨所受等效应力在单侧偏中骨水泥灌注较高 114.76 MPa(单侧偏中 2 ml)、114.83 MPa(单侧偏中 4 ml),考虑单侧骨水泥灌注侧屈是向骨水泥一侧,单侧偏中骨水泥在椎体一侧分布较少;T12 下终板所受应力在双侧骨水泥 4 ml 灌注中较高为 8.62 MPa。L2 椎体皮质骨所受等效应力在单侧偏中 4 ml 骨水泥灌注中较高为 9.80 MPa。旋转载荷下,T12 椎体皮质骨所受等效应力在单侧 2 ml 骨水泥灌注中较高为 119.42 MPa;T12 下终板所受应力在单侧 2 ml 骨水泥灌注中较高为 8.77 MPa。L2 椎体皮质骨所受等效应力在单侧 2 ml 骨水泥灌注中较高为 146.31 MPa;L2 上终板所受应力在单侧 2 ml 骨水泥灌注中较高为 7.84 MPa。不同骨水泥量及在椎体内的分布,在不同力学载荷下,相邻椎体及终板所受应力应变不同,因此我们考虑相邻椎体骨折的风险不但与骨水泥量及其分布有关,与所受力学载荷方向也密切相关。

Molloy 等的研究结果显示占椎体体积 16.2% 的骨水泥足够恢复椎体的强度,29.8% 足够恢复刚度^[10]。但是 Belkoff 研究发现,2 ml 骨水泥可以恢复强度,4 ml 骨水泥可以恢复刚度^[6]。Liebschner 应用有限元研究显示 15% 椎体体积的骨水泥足够恢复椎体的强度,但是过量体积的骨水泥导致强度增大,不对称的骨水泥分布会导致生物力学的不平衡^[11]。Boszczyk 研究了以往学者的临床及生物力学实验,得出有效恢复椎体强度最少需要 4 ml 骨水泥,这与 Kim 的研究相似,其骨水泥量为 3.97 ml (15%)。Luo 等^[12]应用胸腰段运动节段椎体代替单一椎体,建立椎体骨折骨水泥灌注模型,通过生物力学实验,认为恢复运动节段的刚度至少需要 7ml 骨水泥,考虑到骨水泥渗漏,实际的骨水泥量为 5.43 ml (24.6%)。Aquarius 等认为椎体应力峰值与骨水泥在椎体内分布无明显关联^[13]。

当然本模型有不足之处,模型做了相对简化,各种组织被看为是同质、各向同性及线弹性材料。模型没有模拟骨折的楔形变,是在高度正常的椎体内灌注骨水泥,不能完全代表所有椎体成形术情况;骨水泥在椎体内的分布比较复杂,本研究只是简单的利用圆柱体进行模拟。以后的研究中,应考虑更多因素对生物力学的影响,建立更精确的模型,对研究

经皮椎体成形术后椎体的生物力学提供一个更为广阔的平台。

【参 考 文 献】

- [1] Lee WS, Sung KH, Jeong HT, et al. Risk factors of developing new symptomatic vertebral compression fractures after percutaneous vertebroplasty in osteoporotic patients [J]. Eur Spine J, 2006, 15(12): 1777-1783.
- [2] Lo YP, Chen WJ, Chen LH, et al. New vertebral fracture after vertebroplasty [J]. J Trauma, 2008, 65(6): 1439-1445.
- [3] Nieuwenhuijse MJ, Van Erkel AR, Dijkstra PD. Cement leakage in percutaneous vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fractures: identification of risk factors [J]. Spine J, 2011, 11(9): 839-848.
- [4] Berlemann U, Ferguson SJ, Nolte LP, et al. Adjacent vertebral failure after vertebroplasty. A biomechanical investigation [J]. J Bone Joint Surg Br, 2002, 84(5): 748-752.
- [5] Baroud G, Heini P, Nemes J, et al. Biomechanical explanation of adjacent fractures following vertebroplasty [J]. Radiology, 2003, 229(2): 606-607; author reply 607-608.
- [6] Belkoff SM, Mathis JM, Jasper LE, et al. The biomechanics of vertebroplasty. The effect of cement volume on mechanical behavior [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26(14): 1537-1541.
- [7] Rohlmann A, Boustani HN, Bergmann G, et al. A probabilistic finite element analysis of the stresses in the augmented vertebral body after vertebroplasty [J]. Eur Spine J, 2010, 19(9): 1585-1595.
- [8] Chen B, LI Y, Xie D, et al. Comparison of unipedicular and bipedicular kyphoplasty on the stiffness and biomechanical balance of compression fractured vertebrae [J]. Eur Spine J, 2011, 20(8): 1272-1280.
- [9] Kim JM, Shin DA, Byun DH, et al. Effect of bone cement volume and stiffness on occurrences of adjacent vertebral fractures after vertebroplasty [J]. J Korean Neurosurg Soc, 2012, 52(5): 435-440.
- [10] Molloy S, Riley LH, 3RD, Belkoff SM. Effect of cement volume and placement on mechanical-property restoration resulting from vertebroplasty [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2005, 26(2): 401-404.
- [11] Liebschner MA, Rosenberg WS, Keaveny TM. Effects of bone cement volume and distribution on vertebral stiffness after vertebroplasty [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26(14): 1547-1554.
- [12] Luo J, Daines L, Charalambous A, et al. Vertebroplasty: only small cement volumes are required to normalize stress distributions on the vertebral bodies [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34(26): 2865-2873.
- [13] Aquarius R, Van Der Zijden A M, Homminga J, et al. Does Bone Cement in Percutaneous Vertebroplasty Act as a Stress Riser? [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2013, 38(24): 2092-2097.

(收稿日期: 2014-07-14)

规范医学名词

(不规范 - 规范)

嗽口 - 漱口	成份 - 成分	同功酶 - 同工酶	综合症 - 综合征	甲氨喋呤 - 甲氨蝶呤
海棉 - 海绵	烦躁 - 烦躁	排它性 - 排他性	适应症 - 适应证	基因片断 - 基因片段
瘀血 - 淤血	纵膈 - 纵隔	记数法 - 计数法	禁忌症 - 禁忌证	丝裂酶素 - 丝裂霉素
连结 - 连接	巯基 - 巯基	转酞酶 - 转肽酶	环胞素 - 环孢素	环氧化酶 - 环氧合酶

(本刊编辑部)

骨水泥量及分布对椎体成形术后相邻椎体生物力学影响的三维有限元分析



作者: [卢昌怀](#), [刘志军](#), [张宏波](#), [常峥](#), [王瑜](#), [周伟平](#), [LU Changhuai](#), [LIU Zhijun](#),
[ZHANG Hongbo](#), [Chang Zheng](#), [Wang Yu](#), [Zhou Weiping](#)
作者单位: [湖南常德市第一中医医院骨伤科脊柱病区 415000](#)
刊名: [中国骨质疏松杂志](#) 
英文刊名: [Chinese Journal of Osteoporosis](#)
年, 卷(期): 2015(1)

引用本文格式: [卢昌怀](#). [刘志军](#). [张宏波](#). [常峥](#). [王瑜](#). [周伟平](#). [LU Changhuai](#). [LIU Zhijun](#). [ZHANG Hongbo](#). [Chang Zheng](#)
. [Wang Yu](#). [Zhou Weiping](#) [骨水泥量及分布对椎体成形术后相邻椎体生物力学影响的三维有限元分析](#)[期刊论文]-[中
国骨质疏松杂志](#) 2015(1)