

腰椎轴向负荷 MRI 对腰椎退行性疾病诊断的影响

刘庆余 陈建宇 沈君 张晓亚 梁碧玲

【摘要】 目的 评估仰卧位轴向负荷 MRI 对腰椎退行性疾病诊断的影响。方法 对 30 名健康志愿者及 89 例腰腿痛患者进行了常规仰卧腰大肌放松体位 (PRP) 和仰卧位轴向负荷 (ACE) MRI。89 例腰腿痛患者中慢性下腰痛 61 例,坐骨神经痛 19 例,神经性跛行 9 例。观察、分析下腰椎 (L3 ~4、L4 ~5、L5 ~S1 水平) 椎管变化情况。结果 30 名志愿者 90 个椎间盘水平 ACE 检查发现 10 名 (33.3%) 共 14 个椎间盘水平 (15.6%) 硬膜囊横截面积 (DSCA) 缩小 15 mm^2 以上。89 例患者 267 个椎间盘水平 ACE 检查发现 38 例 (42.7%) 55 个椎间盘水平 (20.6%) DSCA 缩小 15 mm^2 以上 (平均缩小 28 mm^2)。89 例患者中 ACE 检查还发现有 26 例 32 个椎间盘突出程度加重, 12 例 16 个椎间盘水平椎间孔狭窄, 10 例 11 个水平黄韧带增厚, 3 例 3 个水平小关节半脱位, 3 例 3 个水平椎体滑脱。89 例患者中 22 例 (24.7%) ACE 检查提供了更多的有效信息, 其中 7 例 (7/9) 神经性跛行患者、8 例 (8/19) 坐骨神经痛患者及 11.5% (7/61) 下腰痛患者 ACE 检查提供了有效信息。结论 与常规检查方法比较, ACE MRI 能提供附加有效信息, 能发现更多的隐匿性病变, 对诊断腰椎退行性病变具有重要意义。

【关键词】 腰椎; 磁共振成像; 生物力学

The diagnostic value of axially loaded magnetic resonance imaging in patients with degenerative disorders of lumbar spine LIU Qing-yu, CHEN Jian-yu, SHEN Jun, ZHANG Xiao-ya, LIANG Bi-ling. Department of Radiology, the Second Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510120, China

Corresponding author: CHEN Jian-yu, Email: chenjianyu5562@sina.com

【Abstract】 Objective To evaluate the diagnostic value of axially loaded MR imaging with supine position in patients with degenerative disorders of lumbar spine. Methods Thirty asymptomatic volunteers and 89 patients were examined in psoas-relaxed position (PRP) and axially compressed supine position (ACE) of the lumbar spine. Sixty-one patients with low back pain, 19 with sciatica and 9 with neurogenic claudication were included in the symptomatic study group. The disc levels from L3 to S1 were examined. Results In 30 asymptomatic volunteers, a significant decrease in dural sac cross-sectional area (DSCA) was found at 14 disc levels (15.6%) in 10 individuals (33.3%) during ACE ($>15 \text{ mm}^2$). In 89 patients, a significant decrease in DSCA was found at 55 disc levels (20.6%) in 38 patients (42.7%) during ACE ($>15 \text{ mm}^2$), and the mean decrease was 28 mm^2 . During ACE, 32 disc levels with an increasing severity of disc herniation were noted in 26 patients, 16 disc levels with neural foramen stenosis were found in 12 patients, 11 disc levels with ligamentum flavum thickening were observed in 10 patients, 3 cases facet dislocation and 3 cases lumbar spondylolisthesis were also seen. In 22 of the 89 patients (24.7%), additional valuable information (AVI) was found during ACE, including 7 patients (7/9) with neurogenic claudication, 8 patients (8/19) with sciatica, and 11.5% (7/61) of the patients with low back pain. Conclusion As compared with conventional imaging methods, axially loaded imaging provides AVI, and more occult lesions can be found during ACE. ACE MRI is a valuable tool in diagnosing degenerative disorders of lumbar spine.

【Key words】 Lumbar vertebrae; Magnetic resonance imaging; Biomechanics

腰椎退行性病变引起的下腰痛、坐骨神经痛及神经性跛行是常见病, 部分患者在常规 CT 或 MR 检

查中未能发现与临床症状相对应的病变征象而导致治疗困难。腰椎轴向负荷 (axial compression in extension, ACE) CT、MR 检查能模拟人体站立位时腰椎所承受的生理负荷状态, 因而比常规仰卧腰大肌放松体位 (psoas-relaxed position, PRP) CT、MR 检查

基金项目: 广东省医学科研基金资助项目 (A2006195)

作者单位: 510120 广州, 中山大学附属第二医院放射科

通信作者: 陈建宇, Email: chenjianyu5562@sina.com

更能真实反映腰椎在直立状态时的病理生理状态, 能够提供更多的有价值信息, 有助于对腰椎退行性疾病进行更准确的诊治^[14]。本研究的目的是评估 ACE MRI 在腰椎退行性疾病诊断中的价值。

资料与方法

1. 研究对象: 无症状志愿者 30 名为对照组, 男 18 名, 女 12 名, 年龄 20 ~59 岁, 平均 40 岁。入选标准: 由专科医师详细询问病史并进行严格的体格检查, 确认无腰腿痛、坐骨神经痛或神经性跛行等症状或体征。向志愿者说明此研究的目的和方法, 取得其同意并签署知情同意书。病例组: 2005 年 3 月至 2006 年 5 月共 89 例腰腿痛患者接受了 PRP 和 ACE MRI, 男 48 例, 女 41 例。其中慢性单纯下腰痛 61 例, 坐骨神经痛 19 例, 神经性跛行 9 例。年龄 22 ~67 岁, 平均 44 岁, 病程为 1 个月至 10 年。

30 名志愿者及 89 例患者在进行腰椎 ACE MRI 前都进行了常规腰椎 MRI 以了解腰椎情况, 有明显骨质疏松、脊柱骨折或炎症、脊柱恶性肿瘤的患者不在本研究的范围内。30 名志愿者中常规腰椎 MRI 诊断为椎间盘变性 7 例, 椎间盘膨出或突出 22 例, 椎间盘脱出 1 例。89 例腰腿痛患者中常规腰椎 MRI 诊断为椎间盘变性 3 例, 椎间盘膨出或突出 82 例, 椎间盘脱出 4 例。

2. 负荷装置: 自行设计负荷装置, 主要组件包括: (1) 负荷背心: 由加强尼龙布制成, 大小有多种型号; (2) 牵引带: 由加强尼龙带制成, 连接在负荷背心上; (3) ACE 力测量装置: 采用 4 根去磁后的不锈钢弹簧作为应力装置, 弹簧组件装在脚踏板上; (4) 脚踏板: 采用硬质木材; (5) 铝合金小配件若干。所有组件均无磁性。先行预试验, 测量弹簧负荷重量与弹簧伸拉长度的关系, 做好记录, 并制作长度标尺, 镶在负荷器上。进行 ACE 检查时, 患者取仰卧位, 穿戴负荷背心, 脚踏板置于脚下, 将牵引带与弹簧组件连接。负荷时先屈双膝, 然后伸膝、蹬直小腿, 轴向压力通过负荷背心-牵引带-弹簧-脚踏板系统向检查者轴向施压。利用不同厚度的脚垫调节弹簧伸拉长度, 进行压力的微调, 压力值通过长度标尺读取。以此可达到轴向加压的目的, 模拟直立时腰椎所受的 ACE(图 1)。

3. MR 检查方法: MR 检查均分别采用 PRP 和 ACE 2 种体位。PRP MRI: 与常规腰椎 MRI 方法相同, 患者取仰卧位。采用 Philip 公司 1.5 T MR 设备, 使用表面线圈, 采集横断面和矢状面 T₁WI 和

T₂WI 快速自旋回波序列图像, 扫描层厚 2 mm, 层间隔 0.4 mm; T₁WI: TR 700 ~900 ms, TE 12 ms, 2 次采集; T₂WI: TR 3000 ms, TE 120 ms, 2 次采集。PRP MRI 结束后紧接着进行 ACE 检查。ACE MRI: 采用上述自行研制的负荷装置, 通过调节弹簧组件的长度调整负荷压力, 负荷压力为患者体重的 40% ~ 50%, 患者取仰卧位, ACE MRI 的扫描参数和 PRP MRI 相同, 前后 2 次扫描的层面尽量保持一致。疼痛明显而不能耐受负荷者, 检查前 2 h 口服甾体类止痛药镇痛。



图 1 腰椎负荷装置及患者体位。患者取仰卧位, 轴向压力通过自制负荷装置向检查者轴向施压

4. 观察指标: PRP 和 ACE 检查观察指标包括, 采用横断面图像观察 L₃~4、L₄~5、L₅~S₁ 各椎间盘水平硬膜囊横截面积 (dural sac cross-sectional area, DSCA) 及形态、椎间盘膨出或突出情况、椎间孔狭窄及神经根受压情况、小关节及黄韧带变化情况, 采用矢状面图像了解脊柱有无滑脱。对每个椎间盘水平 DSCA 进行测量, 取测量 3 次的平均值。与 PRP 检查比较, ACE 检查 DSCA 缩小超过 15 mm² 即认为 DSCA 有明显缩小, 具有临床意义。ACE 检查中发现以下情况定义为增加了有效信息 (additional valuable information, AVI)^[21]: (1) ACE 检查较 PRP 检查 DSCA 有明显减小 (>15 mm²) 并缩小至 75 mm² (椎管绝对狭窄的临界值) 以下; (2) PRP 检查中可疑的椎间盘突出、椎间孔狭窄、腰椎滑脱或椎管内滑液囊肿在 ACE 检查中变得明显。上述 2 种情况发现其中任何一种均认为 ACE 检查提供了 AVI。

结 果

1. 对照组检查结果: 30 名志愿者共 90 个椎间盘水平, ACE 检查发现 10 名 (33.3%) 共 14 个椎间盘水平 (15.6%) DSCA 缩小 15 mm² 以上。4 名 6 个椎间盘水平 PRP 检查 DSCA >75 mm², 但 ACE 检查

发现该水平 DSCA 明显缩小 ($>15 \text{ mm}^2$), 且缩小至 75 mm^2 以下, 即达到椎管绝对狭窄的诊断标准。另外 ACE 检查还发现 4 名共 6 个椎间盘水平椎间盘突出程度加重, 10 名共 15 个椎间盘水平黄韧带增厚。30 名志愿者中 PRP 及 ACE 检查均未发现椎间孔狭窄或小关节半脱位、椎体滑脱等改变。

2. 病例组检查结果: 89 例患者共 267 个椎间盘水平, ACE 检查发现 38 例 (42.7%) 55 个椎间盘水平 (20.6%) DSCA 缩小 15 mm^2 以上, 平均缩小 28 mm^2 (范围 $15 \sim 62 \text{ mm}^2$)。坐骨神经痛及神经性跛行组 ACE 检查发现 DSCA 明显缩小 ($>15 \text{ mm}^2$) 者更多见 (图 2 ~ 5), 分别为 13 例 (13/19) 和 7 例 (7/9), 而单纯下腰痛组相对少见, 仅为 29.5% (18/61) (图 6, 7)。89 例患者中有 9 例 11 个椎间盘水平 PRP 检查 DSCA $>75 \text{ mm}^2$, 但 ACE 检查发现该水平 DSCA 明显缩小 ($>15 \text{ mm}^2$), 且缩小至 75 mm^2 以下 (表 1), 其中坐骨神经痛患者 5 例 5 个椎间盘水平, 神经性跛行患者 4 例 6 个椎间盘水平。

表 1 9 例 ACE 检查 DSCA 有明显减小并降到 75 mm^2 以下的患者 PRP 和 ACE 测量结果 (mm^2)

例序	L3 ~4		L4 ~5		L5 ~S1	
	PRP	ACE	PRP	ACE	PRP	ACE
1	205	187	125	63 ^a	140	112
2	167	143	97	68 ^a	112	97
3	182	163	134	96	90	56 ^a
4	238	205	105	75	120	106
5	97	65 ^a	154	138	96	70 ^a
6	124	94	90	63 ^a	88	86
7	162	145	85	65 ^a	80	62 ^a
8	139	132	119	105	96	63 ^a
9	235	227	77	52 ^a	62	52 ^a

注: ^a 表示发生改变的椎间盘水平。ACE 为腰椎轴向负荷; DSCA 为硬膜囊横截面积; PRP 为腰大肌放松体位

89 例患者 ACE 检查还发现腰椎其他改变: (1) 26 例共 32 个椎间盘突出程度加重, 其中坐骨神经痛 12 例 16 个椎间盘, 神经性跛行 6 例 8 个椎间盘, 下腰痛 8 例 8 个椎间盘; (2) 12 例共 16 个椎间盘水平椎间孔狭窄, 其中坐骨神经痛 6 例 8 个水平, 神经性跛行 5 例 7 个水平, 下腰痛仅 1 例 1 个水平; (3) 10 例共 11 个水平黄韧带增厚, 其中坐骨神经痛 4 例 4 个水平, 神经性跛行 4 例 5 个水平, 下腰痛 2 例 2 个水平; (4) 小关节半脱位以及椎体 \sim 度滑脱各 3 例 3 个水平 (表 2)。

89 例患者中 22 例 (25%) ACE 检查后发现 AVI, 包括 8 例 (8/19) 坐骨神经痛、7 例 (7/9) 神经

性跛行和 7 例 (7/61, 11.5%) 单纯下腰痛患者。

讨 论

1. 腰椎 ACE 装置的研制及其机理: 在临床工作中经常会遇到这种情况, 腰椎退行性病变引起的下腰痛、坐骨神经痛及神经性跛行等症状随患者的体位和负荷状态不同而发生变化, 例如在行走、站立和伸髋时症状表现明显, 而在向前弯腰、下蹲和仰卧位屈髋时症状、体征不明显。常规 CT、MRI 是在仰卧位腰大肌放松时进行, 这一体位很少能诱发坐骨神经痛或神经性跛行等症状, 因而常规 CT 或 MRI 在诊断腰椎退行性疾病时存在一定的限度, 不能真实反映脊柱和椎间盘在站立负荷状态下的病理生理变化。

针对上述难题笔者自制了一种腰椎负荷装置, 使之能模拟患者症状、体征最明显的体位 (直立位) 进行 CT 或 MRI。进行 ACE 检查时, 患者取仰卧位, 脚踏板置于脚下, 通过调节踏板上弹簧组件的长度来调整负荷压力大小, 从而模拟人体站立位时腰椎的生理状态。笔者自制的负荷装置与国外商品化的产品戴纳维腰椎应力器 (Dynawell L-spine) 设计原理一致^[1-4], 具有无磁性、无创伤性、操作简便的特点, 可与 CT 和 MR 设备兼容, 且价格低廉, 利于国内各级医院普及。

常规仰卧位 CT、MRI 不能真实反映脊柱和椎间盘在人体直立位负荷状态下的病理生理变化, 而 ACE 检查能模拟人体直立位时腰椎的生理状态。Lee 等^[5] 采用开放式 MR 系统研究了 ACE 检查以及直立位检查对腰椎的影响, 其结果表明 ACE 检查时腰椎的改变与直立位检查时一致, 即 ACE 检查能反映人体站立位时腰椎所承受的生理负荷状态。腰椎负荷装置采用的负荷压力应为人体的 50% 左右, 负荷时间持续 5 min 以上^[3, 6]。

2. 腰椎 ACE 检查对椎管的影响及其临床意义: Willen 等^[4] 首先发明轴向负荷 CT 脊髓造影和 MR 检查技术, 发现 ACE 检查能使 DSCA 明显缩小。Danielson 和 Willen^[6] 对 43 名无症状人群 129 个椎间盘水平进行了 ACE 检查, 发现 24 名 (56%) 35 个椎间盘水平 (27%) DSCA 缩小 15 mm^2 以上 (平均缩小 25 mm^2), 6 名硬膜囊变形。本组也有类似现象, 但本组 30 名志愿者中仅有 10 名 (33.3%) 共 14 个椎间盘水平 (15.6%) DSCA 缩小 15 mm^2 以上, 检出率低于 Danielson 和 Willen^[6] 的研究结果, 这可能与无症状志愿者的年龄组成不同有关。在本组

表 2 腰腿痛患者 ACE 检查发现的各种腰椎变化

症状	DSCA 明显缩小 ($>15 \text{ mm}^2$)		椎间盘突出加重		椎间孔狭窄		黄韧带增厚		小关节半脱位		椎体轻度滑脱	
	例数	椎间数	例数	椎间盘数	例数	椎间数	例数	椎间数	例数	椎间数	例数	椎间数
坐骨神经痛	13	18	12	16	6	8	4	4	0	0	0	0
神经性跛行	7	13	6	8	5	7	4	5	0	0	2	2
单纯下腰痛	18	24	8	8	1	1	2	2	3	3	1	1
合计	38	55	26	32	12	16	10	11	3	3	3	3

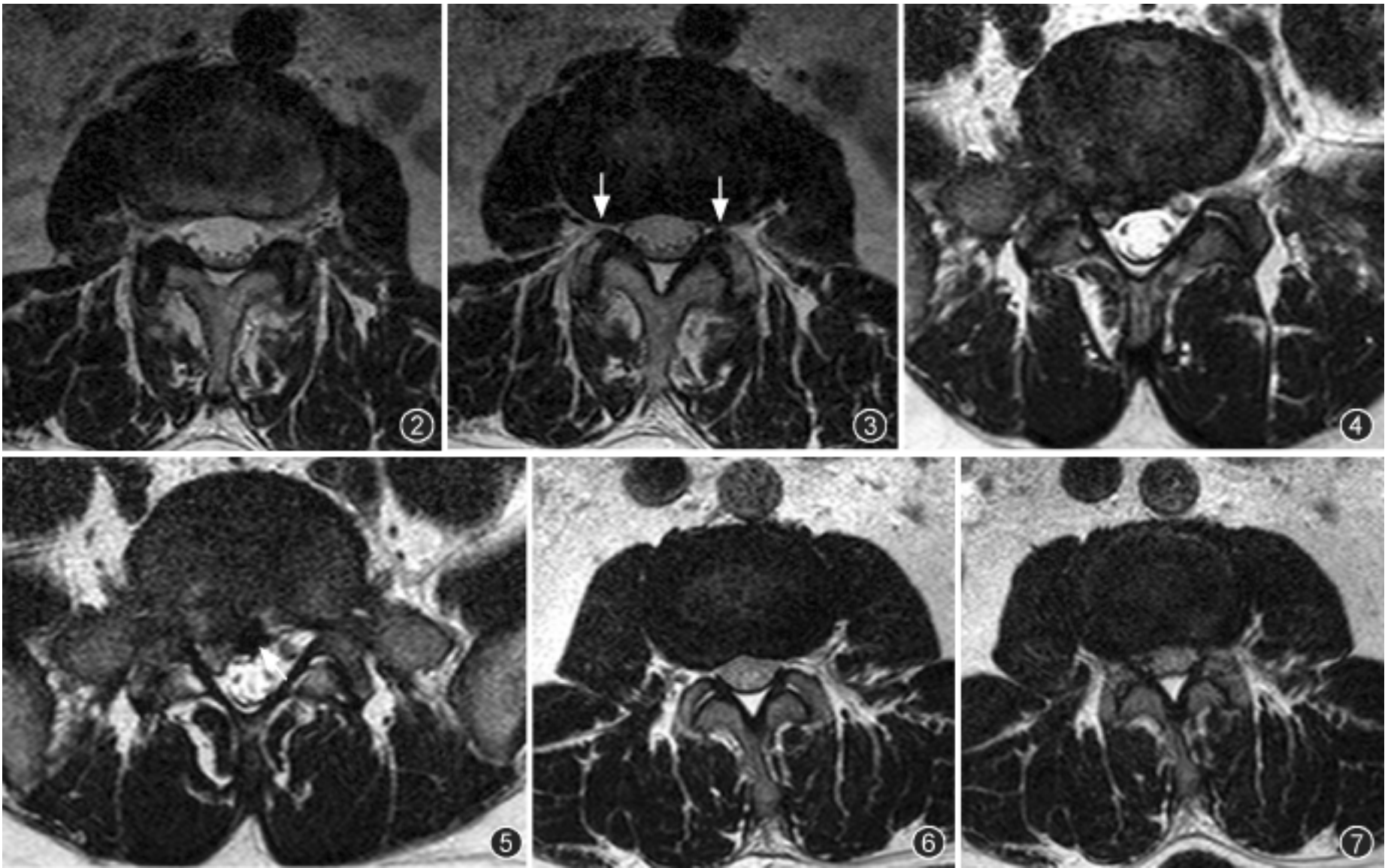


图 2,3 女,38 岁,双侧坐骨神经痛。图 2 为腰大肌放松体位 (PRP) 检查,横断面 T_2 WI 示 L4 ~5 椎间孔以及硬膜囊形态、面积正常。图 3 为腰椎轴向负荷 (ACE) 检查,发现同一节段椎管内背侧脂肪垫增厚、变形,硬膜囊横截面积 (DSAC) 减小 35 mm^2 ,双侧椎间孔狭窄(箭)
图 4,5 男,32 岁,右坐骨神经痛患者。图 4 为 PRP 检查,横断面 T_2 WI 示 L5 ~S1 椎间盘向右后突出,右侧神经根推压。图 5 为 ACE 检查,示同一节段椎间盘突出加重(箭),右侧神经根受压加重,DSCA 缩小 20 mm^2
图 6,7 男,45 岁,慢性腰痛患者。图 6 为 PRP 检查,横断面 T_2 WI 示 L3 ~4 椎间盘正常,硬膜囊正常。图 7 为 ACE 检查,示同一节段 DSCA 缩小约 10 mm^2 ,ACE 检查未能发现有价值信息

30 名志愿者中有 4 名 ACE 检查发现 DSCA 明显缩小,且缩小至 75 mm^2 以下(即达到椎管绝对狭窄的诊断标准),但在检查过程中并未出现任何症状,因而对无症状志愿者,腰椎 DSCA $<75 \text{ mm}^2$ 应当视为椎管狭小,而不应该诊断为椎管狭窄症^[7]。在诊断椎管狭窄症时应将临床症状、体征与影像检查结果紧密结合在一起。

有症状人群 ACE 检查发现 DSCA 明显缩小更多见。Willen 和 Danielson^[2] 对 84 例临床可疑椎管狭窄的患者进行了研究,其中有 66 例 (79%) ACE 检查发现 DSCA 明显缩小。本组 89 例患者 267 个椎间盘水平 ACE 检查发现 38 例 (42.7%) 55 个椎间盘水平 (20.6%) DSCA 缩小 15 mm^2 以上,平均缩

小 28 mm^2 。不同临床症状、体征患者 ACE 检查发现 DSCA 明显缩小的几率不一,其中以坐骨神经痛及神经性跛行者多见,分别为 13/19 和 7/9,而单纯下腰痛组相对少见,仅为 29.5% (18/61)。另外本组中有 9 例 11 个椎间盘水平 PRP 检查 DSCA $>75 \text{ mm}^2$,但 ACE 检查 DSCA 明显缩小至 75 mm^2 以下,因而 ACE 检查可减少椎管狭窄的漏诊率,明确椎管狭窄的部位及程度,对诊断中央性椎管狭窄具有重要意义。

ACE 检查引起腰椎硬膜囊变形、面积明显缩小的因素主要有以下 4 种:(1) ACE 检查能使相邻椎板间距离缩短,导致黄韧带增厚,从而使 DSCA 缩小^[3]。(2) 椎管内背侧脂肪垫形态改变、增厚、前

移^[4]。(3)在 ACE 的作用下,椎间盘面积可增加,即椎间盘突出或膨出加重。Nowicki 等^[8]采用腰椎尸体骨骼进行 ACE 检查,发现进行 ACE 检查时即便是使椎间盘轻度突出或膨出加重,也能使椎管面积明显缩小。(4)笔者还发现 ACE 检查可引起小关节半脱位以及腰椎滑脱,从而引起硬膜囊变形和面积明显缩小。

除了导致 DSCA 明显缩小以外,ACE 检查还可引起腰椎其他改变,例如:椎间盘突出加重、椎间孔狭窄、黄韧带增厚、椎体滑脱、小关节半脱位等。ACE MRI 可显示常规 MRI 所不能显示的隐匿性腰椎滑脱和小关节脱位,本组 89 例患者中有 3 例常规 PRP 检查时小关节及腰椎曲度正常,但负荷后产生小关节脱位及腰椎滑脱,说明脊柱在直立或行走时稳定性差,是产生症状的主要原因。Jayakumar 等^[9]也发现 2 例间歇性跛行患者常规 MRI 没有发现腰椎曲度异常,而 ACE MRI 发现腰椎滑脱伴有椎管狭窄,其中 1 例还发现小关节滑液囊肿形成,因此提示 ACE 检查对诊断腰椎隐匿性病变具有重要意义。

ACE 检查所提供的 AVI 包括:ACE 检查 DSCA 有明显减小($> 15 \text{ mm}^2$)并缩小至 75 mm^2 以下;PRP 检查中可疑的椎间盘突出、椎间孔狭窄或椎管内滑液囊肿在 ACE 检查中变得明显;能发现 PRP 检查所不能发现的隐匿性腰椎滑脱或小关节脱位。2001 年 Willen 和 Danielson^[2]对 172 例患者进行 ACE 检查,其中有 50 例(29%)患者 ACE 检查提供了 AVI,在坐骨神经痛及神经性跛行组,AVI 发现率分别为 14% 和 69%,而单纯下腰痛组发现率为 0%。本组 89 例患者中有 22 例(24.7%)ACE 检查提供了 AVI。不同症状组 AVI 的发现率也有所不同,慢性腰痛患者为 11.5%,坐骨神经痛患者为 8/19,神经性跛行者为 7/9。因此,对临床症状、体征与影像学检查不符合者,特别是对于神经性跛行及坐骨神经痛患者,可建议进行 ACE 检查,有利于查明病因,而对于单纯下腰痛患者,进行 ACE 检查的价值不大。

Hiwatashi 等^[1]进行了 ACE 检查对患者治疗方案影响的研究,结果表明,根据 ACE MRI 资料,临床医师重新评估治疗方案时,有 50% 的患者治疗方案

发生了改变,其中 25% 的患者由原来的保守治疗改变为手术减压治疗,说明常规 PRP MRI 往往低估病变情况,ACE MRI 所获得的有效信息能够影响医师对治疗方案的选择,有助于临床治疗方案的正确设计。但治疗方案的改变能否产生更好的临床疗效,目前尚无系统的随访资料,这是今后需进一步研究的内容。

总之,本研究结果表明,ACE MRI 可为临床提供有价值的附加信息,能发现 PRP MRI 所不能发现的隐匿性病变,对腰椎退行性病变的诊断具有重要价值。但 ACE MRI 仅仅是常规 MRI 的一种辅助检查方法,仅适应于临床症状和体征与影像检查不符合的患者,特别是对坐骨神经痛及神经性跛行患者,ACE 检查将有利于查明病因。对有明显骨质疏松、脊柱骨折、脊柱恶性肿瘤的患者应避免进行 ACE 检查,以免引起骨折或其他严重并发症。

参 考 文 献

- [1] Hiwatashi A, Danielson B, Moritani T, et al. Axial loading can influence treatment decision during MR imaging for symptomatic spinal stenosis. *AJNR*, 2004, 25: 170-174.
- [2] Willen J, Danielson B. The diagnostic effect from axial loading of the lumbar spine during computed tomography and magnetic resonance imaging in patients with degenerative disorders. *Spine*, 2001, 26: 2607-2614.
- [3] Kimura S, Steinbach GC, Watenpaugh DE, et al. Lumbar spinal disc height and curvature responds to an axial load generated by a compression device compatible with magnetic resonance imaging. *Spine*, 2001, 26: 2596-2600.
- [4] Willen J, Danielson B, Gaulitz A, et al. Dynamic effects on the lumbar spinal canal: axially loaded CT-myelography and MRI in patients with sciatica and/or neurogenic claudication. *Spine*, 1997, 22: 2968-2976.
- [5] Lee SU, Hargens AR, Fredericson M, et al. Lumbar spine disc heights and curvature: upright posture vs supine compression harness. *Aviat Space Environ Med*, 2003, 74: 512-516.
- [6] Danielson B, Willen J. Axially loaded magnetic resonance image of the lumbar spine in asymptomatic individuals. *Spine*, 2001, 26: 2601-2606.
- [7] Schonstrom N, Willen J. Imaging lumbar spinal stenosis. *Radiol Clin North Am*, 2001, 39: 31-53.
- [8] Nowicki BH, Yu S, Reinartz J, et al. Effect of axial loading on neural foramina and nerve roots in the lumbar spine. *Radiology*, 1990, 176: 433-437.
- [9] Jayakumar P, Nnadi C, Saifuddin A, et al. Dynamic degenerative lumbar spondylolisthesis: diagnosis with axial loaded magnetic resonance imaging. *Spine*, 2006, 31: E298-E301.

(收稿日期: 2007-03-27)

(本文编辑: 隋行芳)