

**颈动脉粥样硬化斑块  
高分辨磁共振成像**

**解放军总医院放射诊断科  
蔡剑鸣**

**背景**

中国：脑卒中  
新发：每年250万人  
(平均每12秒就有一人发生卒中)  
致死：每年150万人  
(占第1位)

美国：脑卒中  
新发：每年70万人  
致死：每年16万人  
(占第3位)

**背景**

所有脑卒中

- 缺血性(70%)
  - 栓塞性(40%) → 颈动脉粥样硬化(30%)
  - 腔隙性(20%)
  - 脑动脉硬化(10%)
- 出血性(25%)
  - 脑出血(12.5%)
  - 蛛网膜下腔出血(12.5%)
- 其他(5%)

**颈动脉解剖**

Right internal and external carotid  
Left internal and external carotid  
Right common carotid  
Left common carotid  
External carotid artery  
Internal carotid artery  
Common carotid artery

- 颈动脉分叉水平：甲状软骨
- 颈内动脉：颅外无分支

**颈动脉粥样硬化斑块：解剖学因素**

□ 由于血流动力学原因颈动脉斑块主要发生于分叉上下10 mm以内!

1、Underhill HR, et al (2010). "A noninvasive imaging approach to assess plaque severity: the carotid atherosclerosis score." AJNR 31(6):1068-1075.

**颈动脉粥样硬化斑块：临床危险因素**

□ 颈动脉粥样硬化危险因素：

不可改变因素

- 年龄
- 种族
- 性别
- 家族史
- 遗传

可变因素

- 高血压
- 高血脂
- 糖尿病
- 吸烟
- 喝酒
- 高同型半胱氨酸

### 颈动脉粥样硬化斑块的形成

正常颈动脉血管壁结构

### 颈动脉粥样硬化斑块的形成

颈动脉粥样硬化的发生、发展

### 颈动脉粥样硬化斑块的形成

颈动脉粥样硬化是一个多种因素所介导的长期、慢性炎症过程<sup>2</sup>

2. Ross, R. (1999). "Atherosclerosis is an inflammatory disease." *Am Heart J* 138(5 Pt 2): S419-420.

### 稳定与不稳定（易损）颈动脉斑块

**稳定斑块**

■ 斑块不容易产生有症状性狭窄或颈动脉闭塞，也就是说不容易产生严重后果

**不稳定斑块**

■ 斑块容易产生有症状性狭窄或颈动脉闭塞，即使狭窄不太严重，产生有症状性狭窄或颈动脉闭塞的危险性也较高

### 不稳定（易损）颈动脉斑块概念

- 斑块的成份易于脱落致远端血管栓塞<sup>3-4</sup>
- 斑块的结构不稳定易于在短期内急速进展导致管腔堵塞，比如说血栓形成、斑块内出血<sup>3-4</sup>

3. Fuster, et al. (2005). *J Am Coll Cardiol* 46(6): 937-954.  
 4. Fuster, et al. (2005). *J Am Coll Cardiol* 46(7): 1209-1218.

### 不稳定颈动脉斑块与临床风险

5. Mumoli, et al. (2008). *Circulation* 118(24): 2594-2595.

### 不稳定颈动脉斑块病理学特征<sup>6</sup>

- ❑ 薄纤维帽（或纤维帽已经破裂）
- ❑ 大脂质核
- ❑ 富含炎性细胞（巨噬细胞）
- ❑ 较多新生血管
- ❑ 斑块内大范围出血
- ❑ 斑块表面钙化


6. Cai, J, et al. (2002). Circulation 106(11): 1368-1373.

### 颈动脉斑块高分辨MRI优势

- ❑ 显示不稳定性斑块
- ❑ 没有电离辐射

### 颈动脉斑块高分辨MRI扫描设备

- ❑ GE公司3.0T磁共振扫描仪
- ❑ 4或更多通道相控阵颈动脉专用线圈



### 颈动脉斑块高分辨MRI推荐扫描序列

平扫

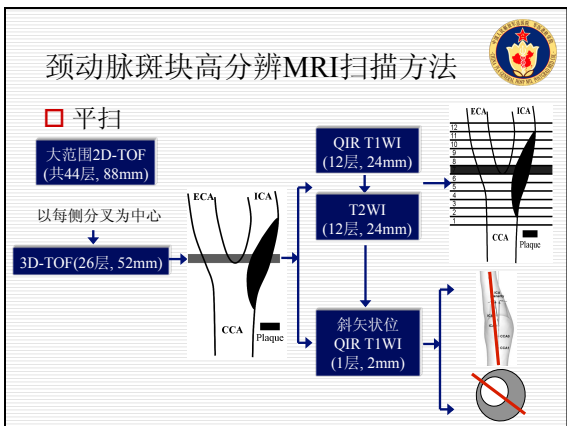
- 轴位 2D-TOF
- 轴位 3D-TOF
- 轴位 QIR T1WI
- 轴位 T2WI
- 斜矢状位 QIR T1WI  
(如果增强扫描, 则使用增强斜矢状位 QIR T1WI)

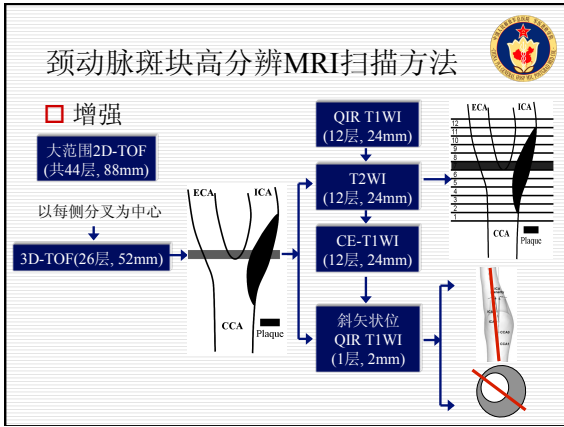
增强

- QIR CE-T1WI
- 增强斜矢状位 QIR CE-T1WI

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列参数

Parameters	2D-TOF	3D-TOF	T <sub>1</sub> W	T <sub>2</sub> W	CE-T <sub>1</sub> W	Oblique T <sub>1</sub> W
Technique	2D GRE	3D GRE	2D FSE	2D FSE	2D FSE	2D FSE
Blood-suppression	-	-	QIR	-	QIR	QIR
TR (ms)	29	29	800	3000	800	800
TE (ms)	4.3	2.1	8.9	57	8.9	8.9
TI (ms)	-	-	600	-	600	600
FOV (cm)	20	14	14	14	14	14
Slices	44	26	12	12	12	2
Matrix size	256×192	256×256	256×256	256×256	256×256	256×256
Slice thickness (mm)	2	2	2	2	2	2
Excitation	1	1	2	2	2	2
Echo train length	1	1	12	10	12	12
Pre-sat	S	S	-	S, I	S, I	-
Fat suppression	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Scan time, min	2.7	3	6	2.3	6	1





### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

“亮血”序列: 时间飞越法 (TOF) MRA

- 流动相关增强
- 非常短TR的梯度回波序列
- 由于TR短, 静态组织在没有充分弛豫时就接受到下一个脉冲的激励, 在脉冲的反复作用下, 其纵向磁化矢量越来越小而达到饱和
- 对于成像容积以外的血流, 因为开始没有接受脉冲激励而处于完全弛豫状态, 当该血流进入成像容积内时才被激励而产生较强的信号

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

“亮血”序列: 时间飞越法 (TOF) MRA

RF

image slice

vessel blood

RF excitation

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

“亮血”序列: 时间飞越法 (TOF) MRA

RF

Signal receiving and T1 recovery

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

“亮血”序列: 时间飞越法 (TOF) MRA

RF

T1 recovery

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

“亮血”序列: 时间飞越法 (TOF) MRA

RF

Next RF excitation

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

□ 时间飞越法 (TOF) MRA

RF → t

"Yellow" part not excited previously !

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

□ TOF MRA血流信号强度影响因素:

- 血流速度: 速度快、信号亮
- 血管与层面角度: 角度直、信号亮
- 层厚: 层厚薄、信号亮
- 重复时间 (TR时间): TE合适、信号亮

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

□ TOF MRA血流信号强度影响因素:

- 速度快、信号亮

Blood flow

slow

fast

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

□ TOF MRA血流信号强度影响因素:

- 角度直、信号亮

vessel

Image slice

Often bright

Not too bright

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

□ TOF MRA血流信号强度影响因素:

- 层厚薄、信号亮

Blood flow

slow

fast

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

□ TOF MRA血流信号强度影响因素:

- TR合适、信号亮:  $Optimal\ TR = thickness / velocity$

Blood flow

slow

fast

optimal TR

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

- TOF MRA血流信号强度影响因素：
  - TR合适、信号亮：Optimal TR = thickness / velocity

Peripheral Vessel Peak Velocities	
Vessel	Peak Velocity (cm/sec)
Aorta (thoracic)	100 - 180
Common carotid artery	80 - 120
Internal carotid artery	80 - 120
External iliac	119 ± 21
Common femoral	114 ± 24

$TR = \frac{\text{层厚 (20mm)}}{\text{流速 (1mm/ms)}} = 20 \text{ ms}$

### TOF MRA 序列参数优化：

Parameters	2D-TOF	3D-TOF	T <sub>1</sub> W	T <sub>2</sub> W	CE-T <sub>1</sub> W	Oblique T <sub>1</sub> W
Technique	2D GRE	3D GRE	2D FSE	2D FSE	2D FSE	2D FSE
Blood-suppression	-	-	QIR	-	QIR	QIR
TR (ms)	29	29	800	3000	800	800
TE (ms)	4.3	2.1	8.9	57	8.9	8.9
TI (ms)	-	-	600	-	600	600
FOV (cm)	20	14	14	14	14	14
Slices	44	26	12	12	12	2
Matrix size	256×192	256×256	256×256	256×256	256×256	256×256
Slice thickness (mm)	2	2	2	2	2	2
Excitation	1	1	2	2	2	2
Echo train length	1	1	12	10	12	12
Fat suppression	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Scan time, min	2.7	3	6	2.3	6	1

考虑到20ms是根据血流峰值流速计算，根据实际情况我们设定TR=29ms

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

- “亮血”序列：2D-TOF versus 3D-TOF
  - 血流信号：2D-TOF更亮，主要用于定位（3D-TOF、T1W、T2W、斜矢状位T1W），一般不用于影像医生对病变进行分析，重建图像便于临床医生直观观察
  - 信噪比及分辨率：3D-TOF更好，主要用于观察管腔狭窄程度及斑块本身的情况

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

- “亮血”序列：2D-TOF versus 3D-TOF
  - 3D-TOF: 原始图像
  - 2D-TOF: 原始图像, 重建图像

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

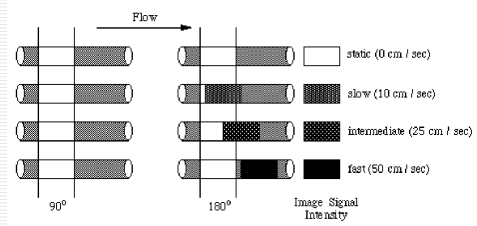
- “黑血”序列：
  - SE序列中的“流空”现象



- 颈动脉斑块高分辨MRI序列中T2WI即利用SE序列中的“流空”现象

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

- “黑血”序列：SE序列中的“流空”现象



一般血流速度大于25 cm/sec，SE-T2WI即表现为“流空信号”

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

- “黑血”序列 (T2WI) 血流信号强度影响因素:
  - 血流速度: 速度快、信号黑
  - 血管与层面角度: 角度直、信号黑
  - 层厚: 层厚薄、信号黑
  - 回波时间 (TE时间): TE长、信号黑

### 序列参数优化:

T2WI  
TE=57 ms

PDWI  
TE=13 ms

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

- “黑血”序列: 四翻转恢复T1WI (quadruple-inversion-recovery T1WI, QIR T1WI)
  - 由两个双反转射频脉冲对及随后的两个反转延迟时间 T11和T12组成
  - 在每个双反转中, 非选择性的脉冲首先将整个目标的磁场反转, 紧接着第2个层面选择性的脉冲立即恢复扫描层的磁场
  - 理论上QIR是一种对血液T1值的变化高度不敏感的新技术, 对较大范围T1值的血流信号 (200-1200 ms), 尤其是增强后的血流都有较好的抑制作用

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

- “黑血”序列: 四翻转恢复T1WI (quadruple-inversion-recovery T1WI, QIR T1WI)

经过2次180°翻转之后, 成像层面外大范围短T1组织 (200-1200 ms, 包括后来流入成像层内的血液) 净磁化矢量接近0, 从而在成像层面无信号 (黑)。

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列原理

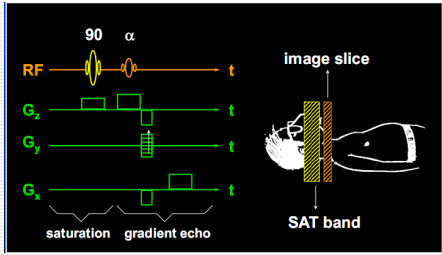
- “黑血”序列: 四翻转恢复T1WI (quadruple-inversion-recovery T1WI, QIR T1WI)

### 颈动脉斑块高分辨MRI序列应用: 预饱和技术的使用

Parameters	2D-TOF	3D-TOF	T <sub>1</sub> W	T <sub>1</sub> W	CE-T <sub>1</sub> W	Oblique T <sub>1</sub> W
Technique	2D GRE	3D GRE	2D FSE	2D FSE	2D FSE	2D FSE
Blood-suppression	-	-	QIR	-	QIR	QIR
TR (ms)	29	29	800	3000	800	800
TE (ms)	4.3	2.1	8.9	57	8.9	8.9
TI (ms)	-	-	600	-	600	600
FOV (cm)	20	14	14	14	14	14
Slices	44	26	12	12	12	2
Matrix size	256×192	256×256	256×256	256×256	256×256	256×256
Slice thickness (mm)	2	2	2	2	2	2
Excitation	1	1	2	2	2	2
Echo train length	1	1	12	10	12	12
Pre-sat	S	S	-	S, I	S, I	-
Fat suppression	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Scan time, min	2.7	3	6	2.3	6	1

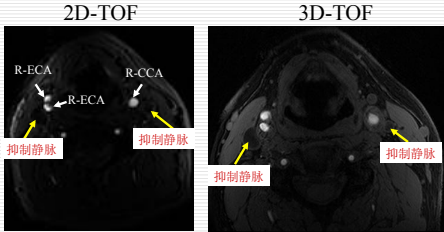
颈动脉斑块高分辨MRI序列应用：预饱和技术的使用

2D-TOF、3D-TOF预饱和带的使用



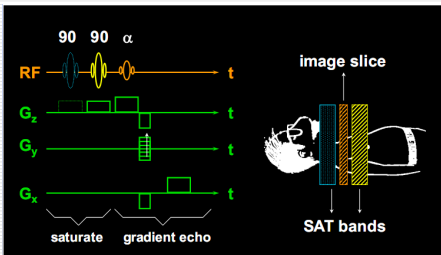
为了抑制**静脉**血流信号，在2D-TOF和3D-TOF扫描时，在扫描层面的头侧使用预饱和带。

颈动脉斑块高分辨MRI序列应用：预饱和技术的使用



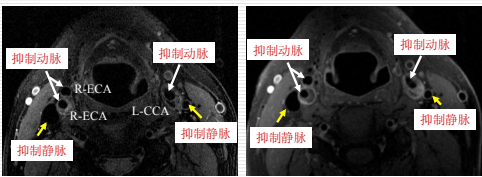
颈动脉斑块高分辨MRI序列应用：预饱和技术的使用

T2WI、CE-T1WI预饱和带的使用



为了协助抑制**动脉**、**静脉**血流信号，在T2WI和CE-T1WI扫描时，在扫描层面头侧和尾侧均使用预饱和带，以达到更好的黑血效果。

颈动脉斑块高分辨MRI序列应用：预饱和技术的使用

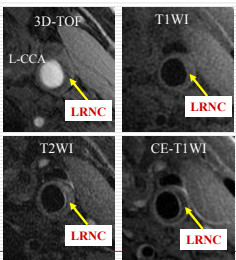


3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

- 定性判断斑块成份：
  - 富脂质坏死核 } CE-T1WI
  - 纤维帽完整性 } CE-T1WI
  - 斑块内出血 } 3D-TOF、T2WI、T1WI
  - 钙化 } 3D-TOF、T2WI、T1WI

3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

- 定性判断斑块成份：富脂质坏死核 (LRNC)
  - 3D-TOF：稍低信号
  - T1WI：等信号
  - T2WI：稍高信号
  - CE-T1WI：低信号





### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

□ 定性判断斑块成份：薄纤维帽或纤维帽部分破裂主要在**CE-T1WI**上判断，表现为斑块内面强化线变薄或不连续

### 薄纤维帽

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

□ 定性判断斑块成份：纤维帽破裂明显时在4个序列图像上均可显示，表现为“龕影”

### 薄纤维帽系列观察

Fibrous cap rupture – 10 month follow up  
BC Chu, et al. Circulation

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

□ 定性判断斑块成份：斑块内出血 (IPH)

**斑块内出血**

- 3D-TOF: 高信号
- T1WI: 较高信号
- T2WI: 等或高信号
- CE-T1WI: 强化不明显

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

□ 定性判断斑块成份：钙化

**斑块钙化**

- 3D-TOF: 低信号
- T1WI: 低信号
- T2WI: 低信号
- CE-T1WI: 低信号
- 显示钙化以3D-TOF最为清楚

### 斑块内出血刺激斑块进展

Baseline

18 months

Takaya et al, *Circulation* 2005; 111:2768

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

斜矢状位T1WI对于斑块成份的显示：纤维帽

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

斜矢状位T1WI对于斑块成份的显示：纤维帽破裂

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

斜矢状位T1WI对于斑块成份的显示：出血

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

斜矢状位T1WI对于斑块成份的显示：出血

### 隐匿性颈动脉斑块破裂

M/81y  
Plaque in the left common carotid artery

First time

### 隐匿性颈动脉斑块破裂

出血、血栓

24th month

### 隐匿性颈动脉斑块破裂

出血、富含新生血管的纤维组织及光滑表面

70th month

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

定量测算管壁结构:

- 总血管面积 (Total vessel area, TVA)
- 管腔面积 (Lumen area, LA)
- 管壁面积 (Wall area, WA)
- 管壁厚度 (Wall thickness, WT)
- 最大标准化管壁指数 (Normalized wall index, NWI)
- 管腔狭窄程度 (Stenosis)

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

定量测算管壁结构:

总血管面积(TVA) = Area (a);  
管腔面积(LA) = Area (b);  
管壁面积(WA) = Area (a) - Area (b);  
标准化管壁指数(NWI) = WA / TVA

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

定量测算管壁结构: WT

最大管壁厚度 (Max-WT)  
平均管壁厚度 (mean WT)

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

定量测算管壁结构: 管腔最大狭窄程度 (Max-stenosis)

Max-stenosis (%) =  $(1 - \text{Min-LA} / \text{NLA}) \times 100\%$   
Min-LA为最小管腔面积, NLA为远侧正常管腔面积

### 3.0T颈动脉斑块高分辨MRI临床应用优势

- 定量测算斑块成份：富脂质坏死核、出血、钙化

### MR定量纤维帽和脂质核

T1WI +c  
Cai J, et al. Circulation 2005,11

### 颈动脉粥样硬化斑块特性与缺血性脑血管病临床症状的关系

- 154名患者，单侧颈内动脉狭窄50%-79%（超声）
- MR检查/12月，临床症状随访/3月，平均随访38个月
- 出现与颈内动脉狭窄同侧相关症状12例
- 斑块特性与临床的关系（危险指数Hazard Ratio）
  - 破裂/薄纤维帽：17.0
  - 斑块内出血：5.2
  - 斑块内平均出血面积增大：2.6/10mm<sup>2</sup>增加
  - 斑块内最大脂质核面积：1.6/10mm<sup>2</sup>增加
  - 斑块最大厚度：1.6/1mm增加

Takaya N, et al, 2006 Stroke

### 颈动脉斑块高分辨MRI：新进展

- SLEEK序列对于斑块内出血的显示
  - 3D黑血扫描技术
  - 使用双反转恢复（inversion recovery, IR）预准备模块，第1个IR用于饱和血流，第2个IR用于恢复扫描层面信号
  - 对静止短T1信号非常敏感

### 颈动脉斑块高分辨MRI：新进展

- SLEEK序列对于斑块出血显示更敏感

### SLEEK显示动脉夹层血栓

## 颈动脉斑块高分辨MRI：新进展



- 基于梯度回波序列(gradient echo, GRE)的三维黑血磁共振成像(three-dimensional black-blood magnetic resonance imaging, 3D-BB-MRI)技术开始逐渐应用于颈动脉成像
- 进行任意方向的重建，尤其在斜矢状位显示颈动脉斑块时，可以得到更准确、可靠的图像
- 为颈动脉支架、内膜剥脱术等提供了更好的术前评价

## 颈动脉斑块高分辨MRI：新进展



- 2D-BB-MRI vs. 3D-BB-MRI

