

# 高质量陆上地震勘探技术

**Claudio Bagaini**

挪威奥斯陆

**Tim Bunting**

马来西亚吉隆坡

**Adel El-Emam**

科威特石油公司  
科威特科威特城

**Andreas Laake**

**Claudio Strobbia**  
英国Gatwick

《油田新技术》2010年夏季刊：22卷，第2期。

© 2010 斯伦贝谢版权所有。

在编写本文过程中得到以下人的帮助，谨表谢意：沙特阿拉伯South Rub Al-Khal有限公司的Abdulmohsin Al-Dulaijan；科威特城科威特石油公司的Jarrah Al-Genai；澳大利亚阿德莱德海滩石油公司的Danny Burns；沙特阿拉伯宰赫兰沙特阿美公司的Daniele Colombo；澳大利亚阿珀斯Santos公司的Dennis Cooke；英格兰Gatwick的Tim Dean、Tom Heesom、Anthony McGlue、John Quigley、Paul Taylor和Richard Whitebread；英格兰剑桥的Benjamin Jeffryes；澳大利亚珀斯的Leif Larsen；意大利米兰的Marco Mantovani；阿联酋迪拜的Denis Sweeney；澳大利亚昆士兰州布里斯班Origin能源有限公司的Randall Taylor，以及文莱壳牌石油公司的Pieter van Mastrigt。

dBX, Desert Explorer, DX-80, MD Sweep Q-Land Q-Technology和UniQ等是斯伦贝谢公司商标。

1. Quigley J: “An Integrated 3D Acquisition and Processing Technique Using Point Sources and Point Receivers”，详细摘要，第74届SEG国际博览会暨年会，丹佛（2004年10月10-15日）：17-20。

Ait-Messaoud M, Boulegroun M-Z, Gribi A, Kasmi R, Touami M, Anderson B, Van Baaren P, El-Emam A, Rached G, Laake A, Pickering S, Moldoveanu N和Özbek A：“陆上地震技术新进展”，《油田新技术》，17卷，第3期（2005年秋季刊）：42-53。

2. Papworth S: “Stepping Up Land Seismic”，E&P（2009年3月1日），<http://www.epmag.com/Magazine/2009/3/item31469.php>（2010年5月11日浏览）。

地震勘探新技术不断给陆上石油勘探开发活动注入新活力，那些过去已被证明为难以精细成像的勘探难点地区，因为有了新技术而重新看到了希望。利用新型震源、采集方法和处理技术能够有效提高复杂近地表下的油藏特征描述精度。

自二十世纪二十年代首次开始陆上地震勘探以来，通过应用先进的勘探设计方案、资料采集技术和处理方法，地震资料质量已获得大幅度提高。尽管如此，在勘探难点地区，包括某些地质储量较可观的地区，采集的地震资料质量仍然不尽人意。

复杂的近地表地质结构常常是导致深层构造成像不够精细的主要原因。地形起伏和近地表层速度变化大造成地震信号失真。因为近地表层速度可能很低，近地表强折射层阻止激发能量向深层传播。近地表地层物性横向变化剧烈使得射线路径发生改变，从而弱化传统处理方法的效果。地形起伏较大、地表沙丘、冻土层和深埋松软地层是公认的严重吸收激发能量、阻止能量向下传播的障碍层。凡是在这类地区进行地震勘探的公司都知道要适当降低他们的勘探预期。

近年来在陆上地震资料采集和处理方面取得的技术进步大幅度提高了上述难点勘探地区的构造成像质量。通过采用先进的震源、优化的采集方法和不断改善的处理算法丰富了有效资料，从而无需降低采集效率就能够大幅度提高构造成像精度，成功反演油藏物性。通过地震信号精细评价，特别是对那些通常被看成是纯噪音的资料进行精细评价，在某些地层复杂地区能够有效提高地下构造成像质

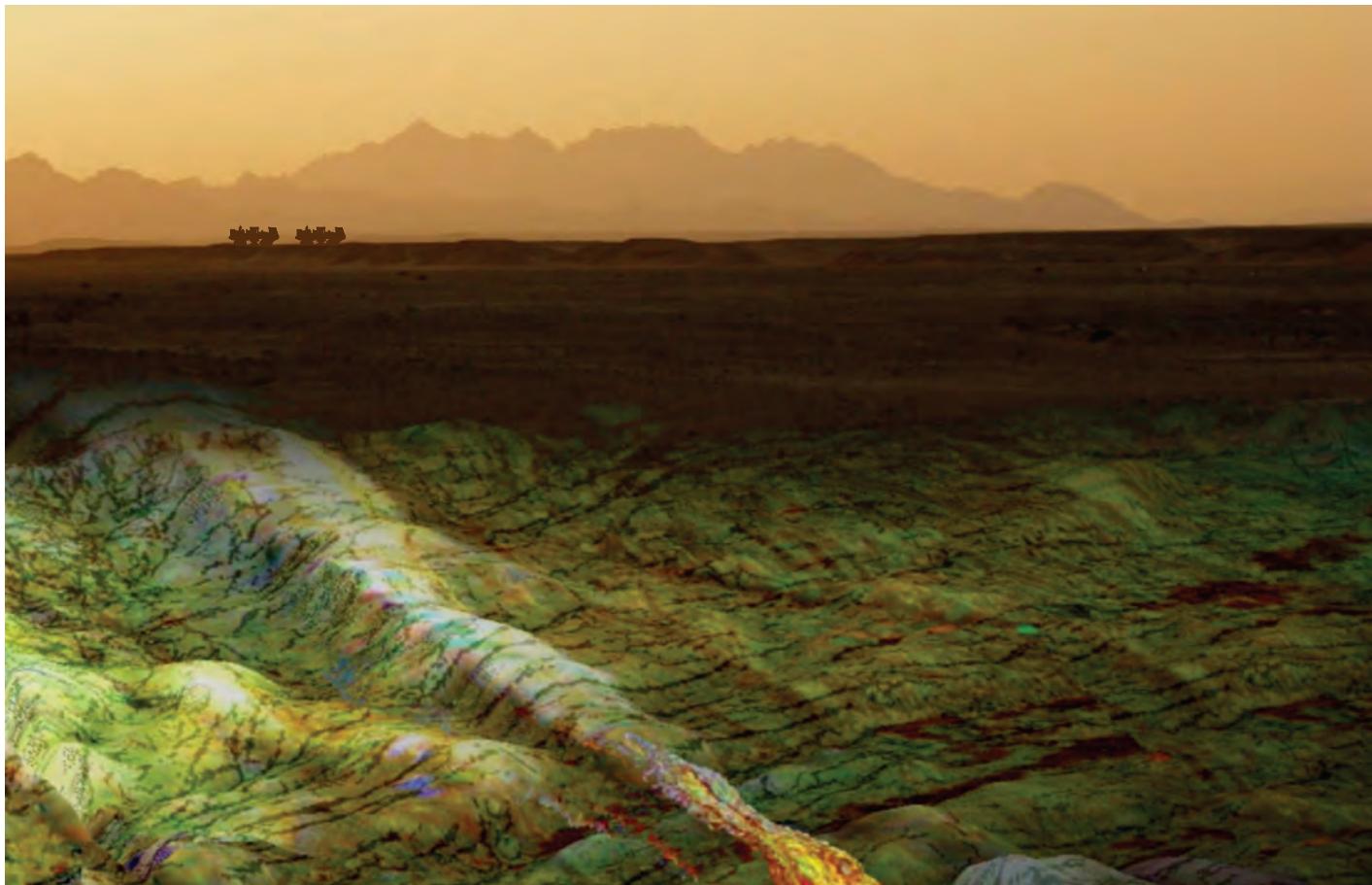
量，而此类地区通常是勘探难点，以往勘探效果较差。再加上其他辅助资料，例如重力勘探、电磁勘探或遥感资料，能够尽可能降低近地表物性的不确定性，从而提高深层目的层的成像精度。

本文综合介绍了近年来陆上地震资料采集和处理技术的进展，可以帮助油气公司在那些已证明是难以成像的难点地区获得有效的勘探成果。其中新型激发技术，包括高性能炸药和可控震源，能够拓宽向地下传播的地震能量频带，部署多台震源提高资料采集效率，都是比较突出的技术进步。新型处理方法包括使用面波资料和其他地球物理勘探资料精细描述近地表地层特征。

因为上述技术进步都依赖于单检波器采集和利用最现代化的陆上地震记录系统实现连续记录才能得到保证，下面我们就按顺序对这些系统进行简要介绍。

## 单点单检波器

单点单检波器采集接收道记录的是单检波器的响应，而常规采集方法接收道记录的是检波器组合的组合响应（下一页，下图）。常规地震采集利用检波器组合衰减沿水平方向传播的相干噪音，加强沿垂直方向传播的信号。但是，记录前因为检波器组合

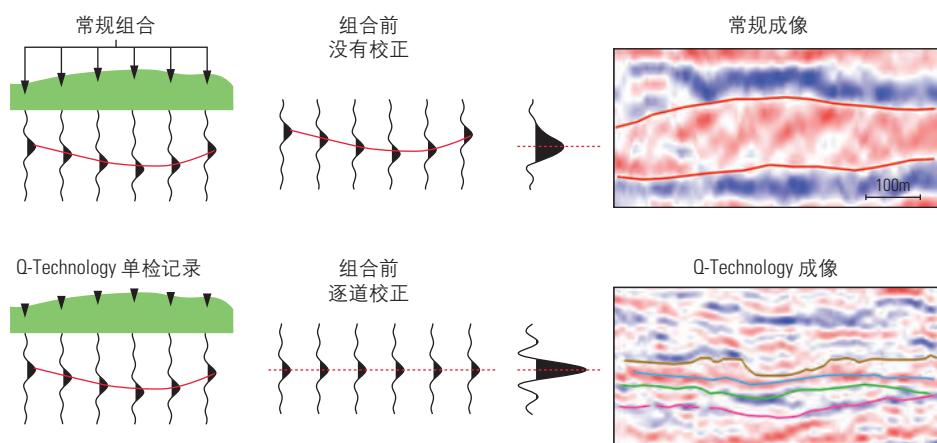


Andreas Laake版权所有。

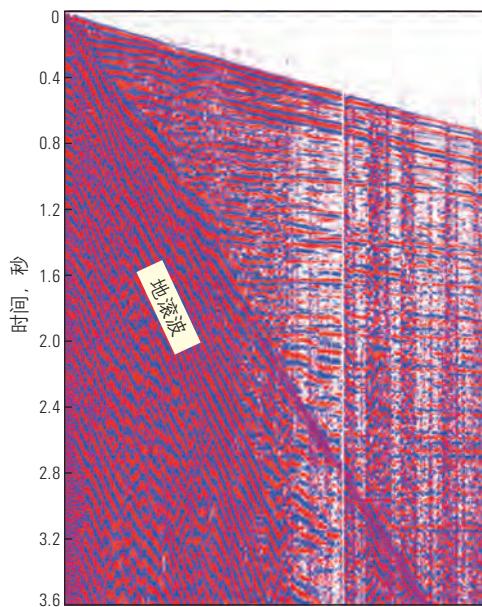
已经对地震信号进行了综合处理，所以下一步处理手段就受到一定程度的限制。

另外，近地表非均质性也使得希望通过检波器组合加强垂直传播的地震信号变得更加困难。接收组合响应的地震道通常也只能记录原始单道的低频端信号。

2002年，西方奇科率先开展单检波器陆上地震采集和处理技术应用，采用能够记录30000道的Q-Land单检系统进行资料记录<sup>[1]</sup>。2009年引入新一代UniQ一体化单检波器记录系统，这套系统采用同样的原理，记录道数高达150000道，能够对地震波场上的信号和噪音进行全面采样<sup>[2]</sup>。常规采集方法一次部署的活道数较少，而单检采集方法从整体上降低了检波器密度，但能够提供超高的信噪比（S/N）和丰富的频率成分。

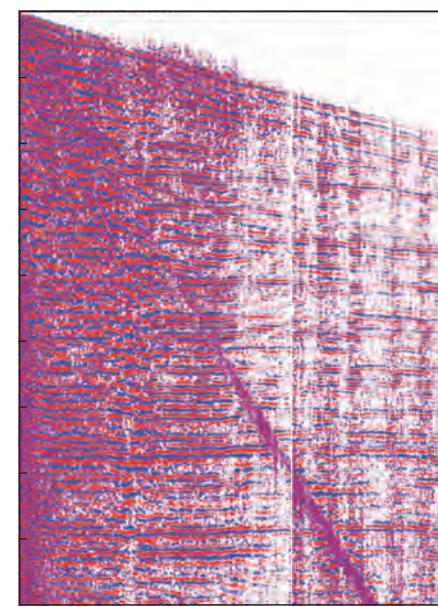


▲ 单点单检采集。陆上地震采集时，检波器（图中用倒三角表示）被部署到地面上（绿色）。因地面高低不平，导致信号（红色）到达时间不同。常规采集方法（上）记录信号前先对信号进行组合，信号到达时间被平均，记录到的组合信号比原始单只检波器接收的信号宽。单点单检波器技术（下）记录的是单只检波器接收的信号，组合前已经对信号进行了校正，这样形成的组合信号较为密实，且信噪比高。单点单检波器技术获得的地震成像剖面（右上）通常比组合检波器技术获得的地震成像剖面（右下）分辨率高。



▲ 地滚波。单检波器记录的炮记录剖面上强振幅地滚波是主要成分（左），但因对其合理采样，经滤波处理后能够使其有效衰减（右）。

单点接收方法能够有效保持地震信号并压制噪音的部分原因在于信号处理过程，在此过程中按照一定的间距对记录道进行组合，做到无需假频处理就能正确成像目的层<sup>[3]</sup>。组合前先对单道进行噪音去除：采用专有程序逐道清除随机噪音；应用静校正或



时移方法进行高程校正和其他旅行时差校正；采用振幅补偿方法校正震源或检波器到地面的耦合差。道与道间的相干噪音，例如震源激发产生的地滚波，因为没有产生假频，通过滤波方法能够有效清除（上图）。

### 地震能量源

加强接收端仅仅是提高地震资料质量工作的一半内容。近年来在震源技术方面取得的进步，通过加强向地下传播的能量，扩大带宽，进一步提高了资料质量。

地震勘探用的理想震源是能够将能量集中到空间的一个点上，并瞬间释放。这种震源产生的高密集子波能够分辨隐蔽地层和构造特征。实际上，震源空间尺寸有限，信号释放也在有限时间内，产生的子波频带变宽，使得资料处理复杂化。

陆上地震资料采集主要依靠两种震源 – 炸药和可控震源。二者各有利弊。一个勘探项目可能使用一种震源或两种震源，具体使用哪种震源取决于多种因素，如勘探目标、成本、环境条件等。

炸药震源通常用炸药做材料，

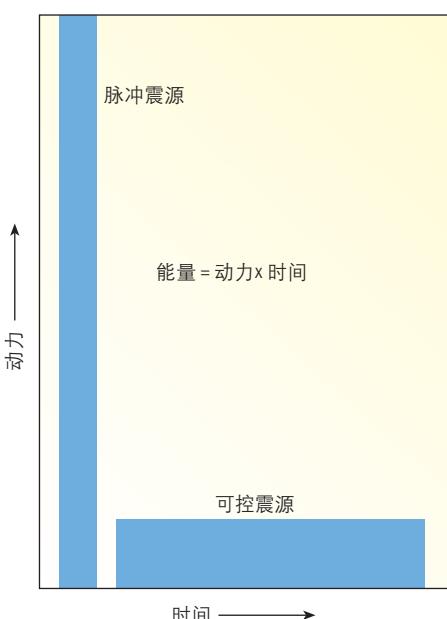
需埋置到钻到近地表风化层或未固结沉积层（几米到几十米厚）下的井眼中。将炸药深埋到低速带下面能够增加向地层深处传播的能量，减少并发干扰波的能量，如震源激发产生的面波。炸药属于短时释放的强动力源（左下图）。所以炸药激发的密集子波频带较宽。相对于可控震源，炸药还具有重量轻、成本低、无需维护、在车辆无法行进的起伏地区容易部署等优势。

炸药震源的缺点是经过钻井、下药、激发后，进行现场恢复需要大量人力，而且不钻新井就无法改变采集排列；输入信号既无法测定也无法可靠重复。另外，使用炸药震源必须严格遵守有关安全规定，必须获得运输、使用许可，而在某些地方很难获得这些许可。人口密集地区使用炸药可能造成破坏，限制了炸药的使用。

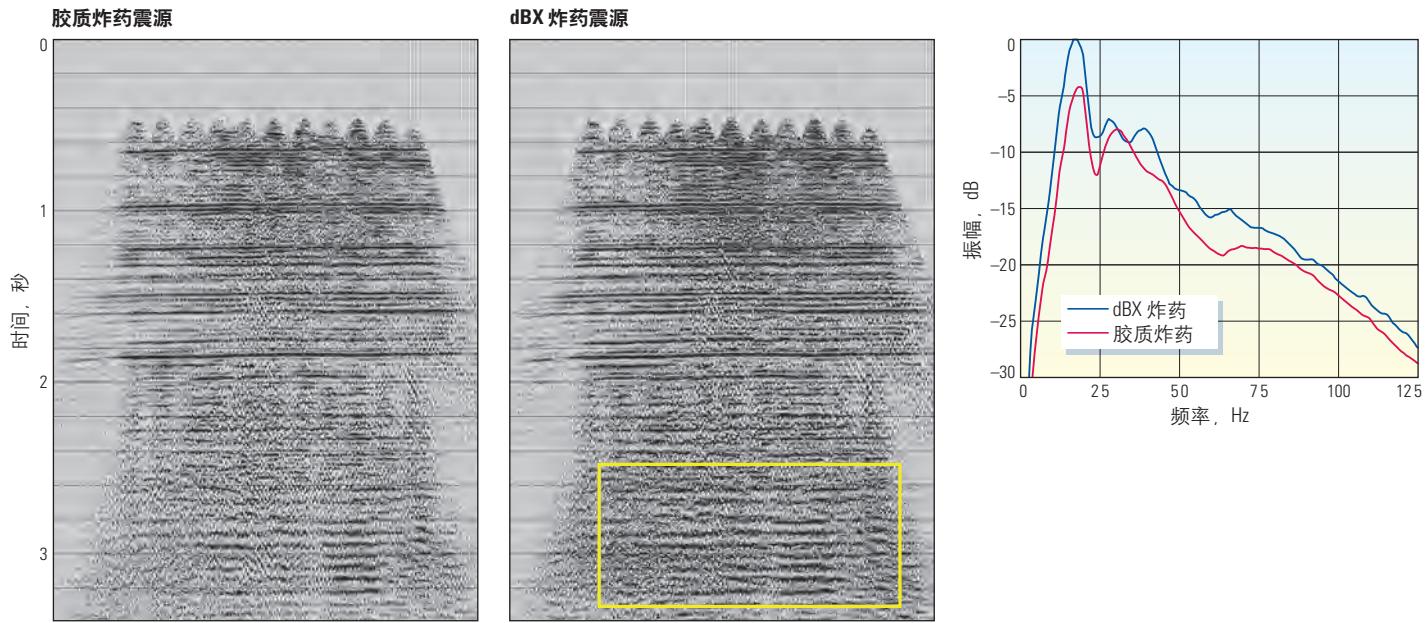
为克服上述炸药使用方面的种种局限性，西方奇科和Dyno Nobel公司联合研发了dBX地震勘探专用炸药，这是第一种专为地震勘探研发的炸药。和常规炸药对比，dBX炸药用于地球物理勘探具有诸多明显优点，能够优化加强向地层深处传播的能量、提高信噪比、扩大信号带宽。通过在加拿大进行对比试验，结果表明dBX炸药能够有效提高深层反射体的成像精度（下一页，上图）。更值得肯定的是这种新型炸药的安全性很好。dBX炸药成分中的固态和液态两种惰性物质可以分开运输，保证运输过程中的安全。达到现场后，野外作业人员只需根据实际用量进行混合调配即可。

可控震源是和炸药完全不同形式的一种震源，通过可控震源车激发能量。可控震源的概念是1952年大陆石油公司提出的。这种移动震源的设计目的是避免钻炸药孔，减轻环境影响，提高施工安全。

可控震源产生的地表运动向地下传播。地表运动的波形是一种唧唧声



▲ 震源能量。脉冲震源如炸药能在短时间内提供较强动力，而可控震源提供的动力持续时间长。这两种震源能提供相同强度的能量（两个蓝色框覆盖的面积相等）。

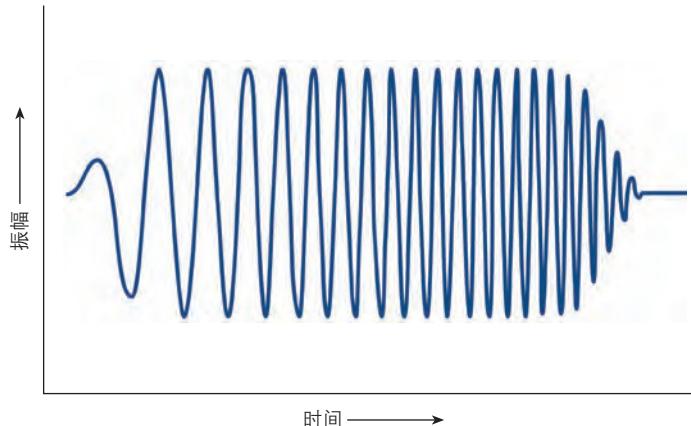


▲ 炸药性能比较。和常规胶质炸药相比，dBX地震勘探专用炸药激发的信号覆盖整个带宽（右）。增加的低频成分对提高深层构造成像精度非常重要。该实例取自加拿大，可以看出用dBX炸药激发（中）得到的深反射层成像（黄色框）比用常规胶质炸药激发得到的结果（左）更清晰。

信号，又称为扫描（[右图](#)）。在频率扫描过程中，地表运动的包络线轨迹从零开始，快速上升到稳定水平，扫描结束时再逐渐归零。这种震源方式可以重复，可以根据实际需要定制参数，控制激发能量的振幅、频率和相位。可通过信息反馈线路实时监控、调整向地表施加的力的强弱。震源车可在城区使用，另外在环境敏感地区，如沙漠或极地雪地，安装专用轮胎或链轨就能投入作业<sup>[4]</sup>。

但在地形条件复杂地区，如山地、沼泽和沿海，震源车自由行进受到一定限制。风化层较厚的地区或沙丘覆盖地区震源效率可能会受影响。另外，震源车的制造和维修保养成本较高。和炸药对比，可控震源激发的输入信号不是脉冲式的，因此需要辅助处理手段提取可解释的资料；需用参考道对记录道进行相关处理后提取反射波信号。

对于多数勘探目标，可控震源的优点还是远远多于其缺点。液压可控震源是目前陆上地震勘探最常用的震源。



▲ 扫描信号。可控震源激发的地面运动是一组变频正弦波。扫描过程中振幅快速从零上升到指定水平。图中所示是一个上行扫描，从低频开始，终止于高频。下行扫描和上行扫描正好相反。

可控震源的性能决定于动力器。可控震源的动力器由一个从动机构和一个主动机构组成。从动机构的主要元件是底板，即安装在震源车中间的一块大长方形板，这块板被车身重量压到地面上。主动机构的主要元件是一块重反应块，其中的活塞被安装在底板上部，通过液压系统驱动重反应块上下移动（[下页，上图](#)）<sup>[5]</sup>。

施工时将震源车开到炮点位置，降低底板到地面上，然后向地面施压。通过控制主动构件内活塞周围的液压流，震源操作手使活塞和底板组

3. 假频是由空间采样或时间域采样不足引起的信号失真，可按照至少两倍的波形最高频率的频率值采样就可避免假频现象发生。
4. Gibson D和Rice S：“在地震作业过程中更好地履行环保责任”，《油田新技术》，15卷，第2期（2003年夏季刊）：10-21。

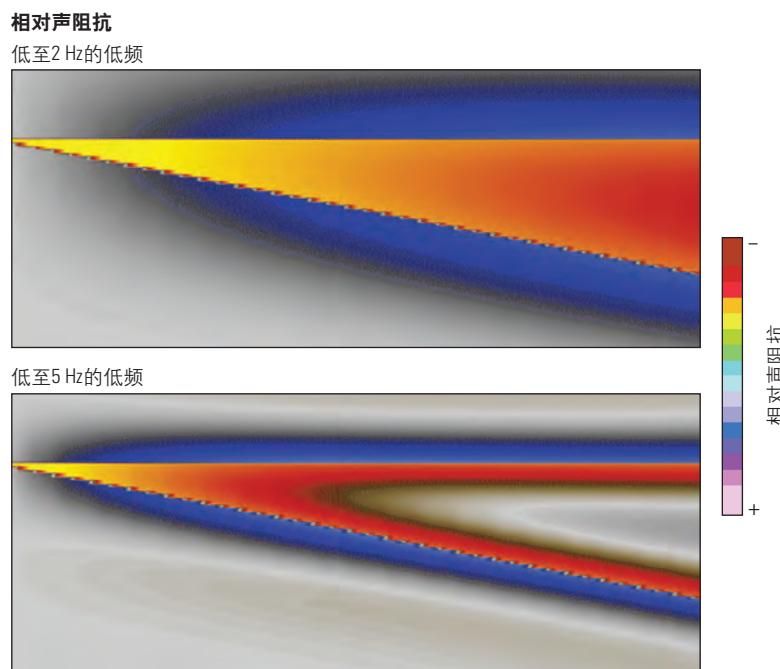


<sup>▲</sup> 震源组件。震源车重量使底板与地面紧密接触。液压系统按照规定频率上下移动反应块，从而增加或减小施加到底板上的力，完成一次扫描。底板约1米（3.3英尺）宽。

合一起，按照规定频率整体上下移动，使振动波通过底板向地层深处传播。

底板经常和一块重量固定的、被称为牵制重块的大型重力块耦合一起。在反应块向上移动、底板向下移动周期内，牵制重块施加的挤压力使

底板与地面充分接触。因此地震用可控震源产生的地面力量总是小于震源车重量与该重力的乘积。发生在可控震源上和地面与底板接触面间的谐振失真或共振额外产生一种向上力，因此在选择最佳震源出力时必须考虑该力的影响。增加牵制块的重量可提高



<sup>▲</sup> 用低频成分反演获得较好结果。增加低频成分能够提高岩石物性反演成果质量。图中所示模型中的页岩相对声阻抗较高，其中包含一个楔形的砂岩，砂岩的声阻抗稳定且较低。采用低至2 Hz（上）的低频地震资料进行反演，既识别出了楔形砂岩的边缘，也确定了砂岩体内部的相对声阻抗。而用低至5 Hz的地震资料反演（下）只识别出了界面处的声阻抗差。（根据Hill等人的资料修改，参考文献6）。

系统稳定性，有助于创造最佳施工条件。

一般可控震源车能够产生高达60000 lbf (267000 N) 的力，扫描长度2–20秒，扫描频率随时间呈线性变化或非线性变化。线性扫描是瞬时频率与时间的关系为一条直线。可以从低频成分开始扫描，结束于高频成分（上行扫描），也可以从相反方向（下行扫描）扫描。

一般可控震源产生的信号带宽为8–105 Hz。通过增加低频和高频成分拓宽带宽能够提高对地震反射体的分辨率<sup>[6]</sup>。提高震源激发的低频成分的能量能够提高储层物性反演质量（左下图）。加强低频成分也能提高深层目的层的成像精度，因为低频成分衰减程度低，所以比高频成分传播得深。低频成分是正确成像吸收层以下构造的关键因素。但低频成分的输出受制于震源车的机械条件，例如反应块的最大位移。高频输出受制于震源车液压性能和机械条件<sup>[7]</sup>。

### 新型激发方法

为克服上述局限性，西方奇科研发出了两种有关震源激发技术：80000 lbf (356000 N) DX-80震源车和MD Sweep最大位移震动方法。结合上述震源系统，能够加强向地下传播的低频和高频能量。

DX-80震源车动力器设计独特，能将输出能量的高频成分提高到150 Hz，而常规震源车输出的高频能量只能达到105 Hz。DX-80震源车向地下输送更多能量，能够有效提高信噪比。而且

5. 某些地震勘探用可控震源被设计成侧向运动，用于激发横波（S波），上下运动激发的是纵波（P波）。
6. Hill D, Bacon J, Brice T, Combee L, Koeninger C, Leathard M and McHugo S: “Over/Under a Technology for Illuminating Deep Objectives”，发表在第69届EAGE大会暨展览会上，伦敦，2007年6月11-14日。
7. Bagaini C, Dean T, Quigley J and Tite G-A: “Systems and Methods for Enhancing Low-Frequency Content in Vibroseis Acquisition”，美国专利第7327633号（2008年2月5日）。

DX-80震源车可安装橡胶履带，具有下列优势：在地表松软地区能够加快震源车从上一个炮点到下一个炮点的移动速度，提高采集效率（右图）；履带式震源车容易操作，无需绕过障碍物，可保持直线行进；能够攀爬陡坡，节省了推土机或其他方式的清线时间，从而最大程度地保护环境。

另一方面，使用MD Sweep方法能够提高信号的低频成分。这种方法帮助地球物理师设计最佳非线性扫描方法，即花费更多时间产生需要加强的频率成分。MD Sweep方式能够使全动力低频带宽增加1.5倍频程，而用常规扫描方式是不可能实现的。用DX-80可控震源，加上MD Sweep方式可将信号带宽扩大到3 Hz以下，极大地提高深层成像精度。在中东地区进行的一次试验结果证明采用非线性最大位移扫

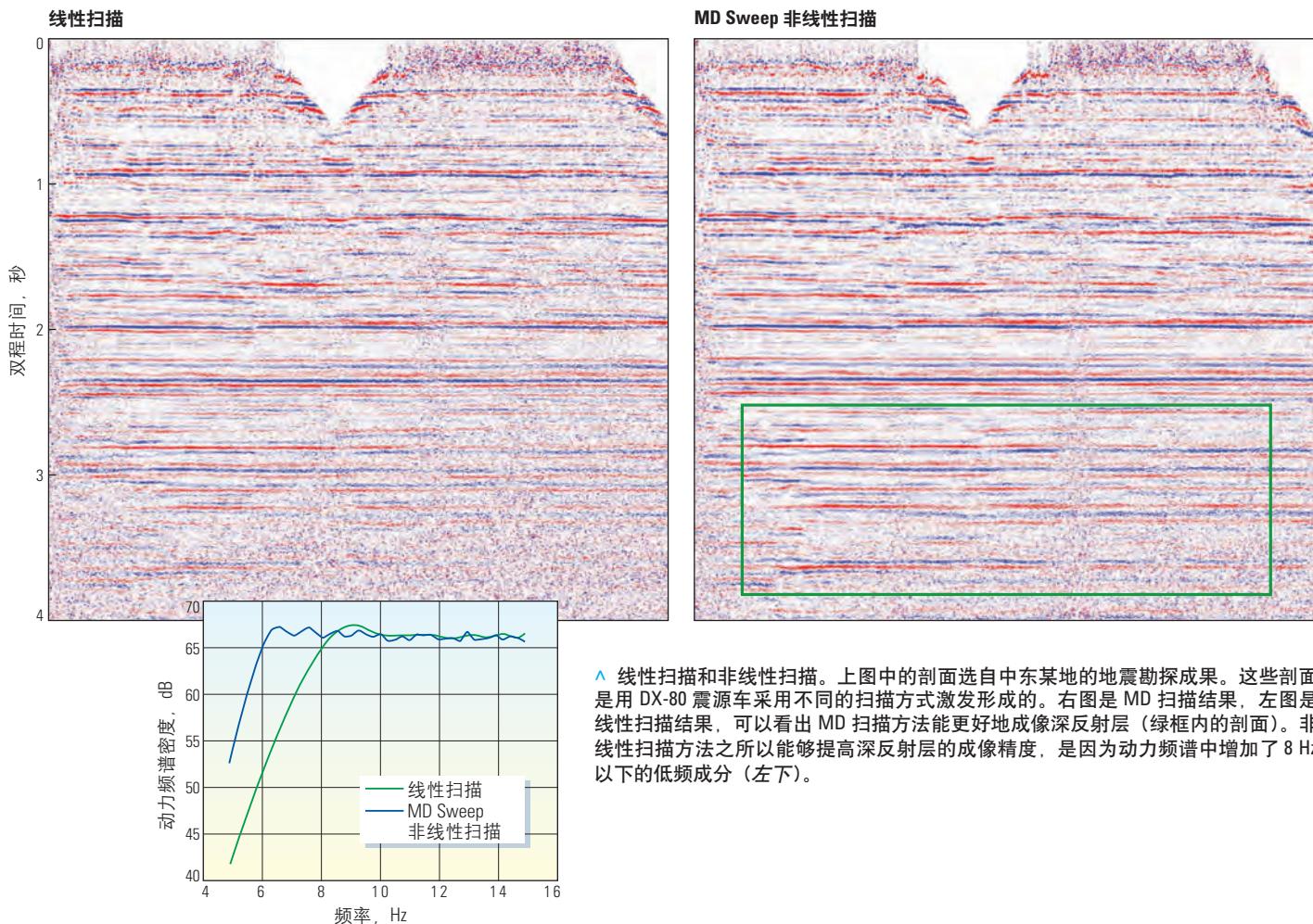


▲ 西方奇科 DX-80 震源车队。出力高达 80000 lbf 的 Desert Explorer 震源车可安装履带，用于松软地表环境。

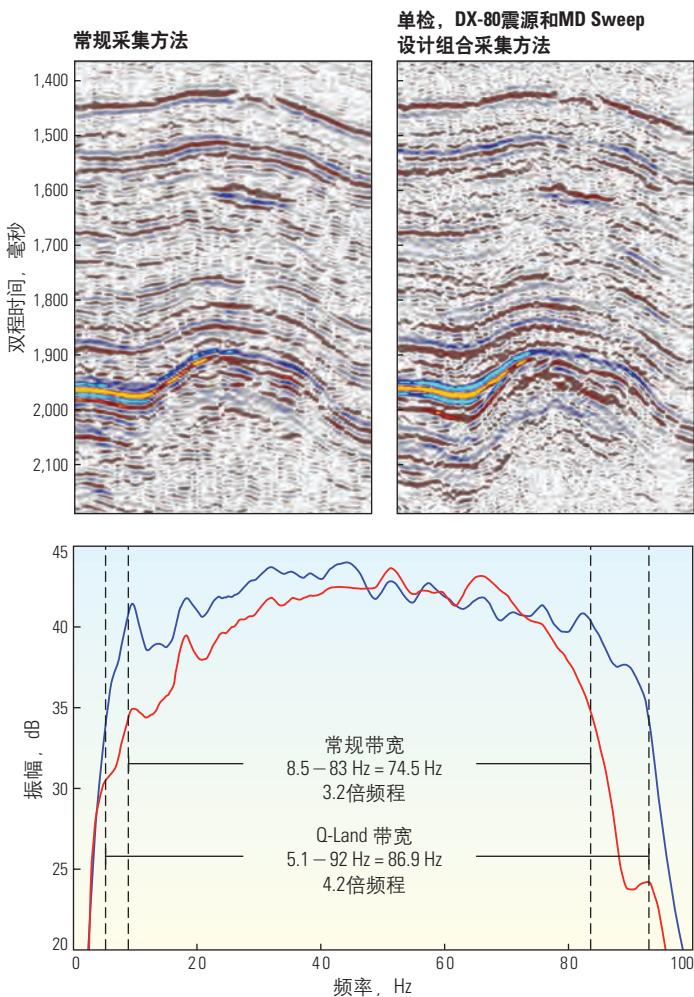
描方法能够增加低频成分，提高深层反射体的成像精度（下图）。

Santos公司及其合资伙伴Origin

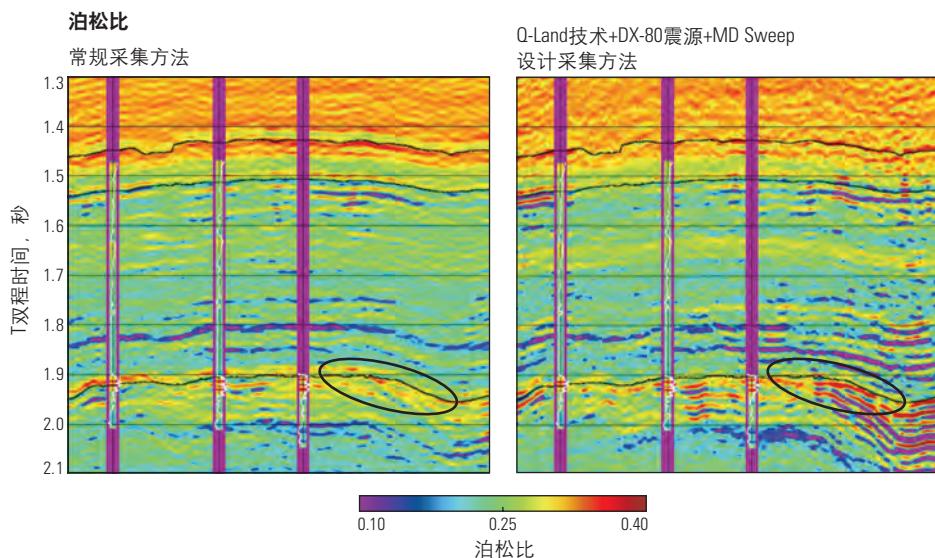
能源有限公司和海滩能源公司在澳大利亚库珀盆地进行了一个试验项目，采用这种技术组合帮助确定储层厚度



▲ 线性扫描和非线性扫描。上图中的剖面选自中东某地的地震勘探成果。这些剖面是用 DX-80 震源车采用不同的扫描方式激发形成的。右图是 MD 扫描结果，左图是线性扫描结果，可以看出 MD 扫描方法能更好地成像深反射层（绿框内的剖面）。非线性扫描方法之所以能够提高深反射层的成像精度，是因为动力频谱中增加了 8 Hz 以下的低频成分（左下）。



▲ 澳大利亚试验项目。单检+DX-80震源+MD Sweep组合方法获得的地震剖面比组合检波器+常规震源产生的地震剖面更清晰（上）。新的采集方法使信号带宽增加了约1个倍频程（下）。



▲ 泊松比反演效果对比。左图是采用常规采集方法获得的泊松比反演剖面，右图是采用Q-Land技术+DX-80震源+MD Sweep设计采集方法获得的泊松比反演剖面。新型采集方法增加了信号带宽，使低泊松比层段反演剖面更清晰（椭圆形区域）。图中三个井位上标注的是泊松比测井记录（紫色）。

和砂岩质量<sup>[8]</sup>。根据附近油田记录的测井资料，低粘土含量的储层质量可能与低泊松比有一定联系<sup>[9]</sup>。其中通过部分试验调查了利用高分辨率地震资料反演储层泊松比和其他属性的效果。

早期采用检波器组合和常规可控震源从目的层深度采集的资料信号带宽为8.5–83 Hz。而用Q-Land单检采集系统和先进的激发技术记录的资料信号带宽为5.1–92 Hz，得到的目的层成像更加清晰（左图）。

采用新型采集技术记录的目的层深度处的相干信号低频成分甚至在4 Hz以下（下页，上图）。采用频带较宽的地震资料反演出的泊松比图像比采用传统采集方法获得的图像更加精细（左下图）。

### 提高生产效率

可控震源可单独或采用组合方式部署 – 常用组合方式是四台震源车同时在一个炮点上作业。完成规定的扫描次数后，抬起底板，将震源车开到下一个炮点。一般移动距离为10–50米（33–160英尺）。与此同时，记录车记录来自地下反射层的信号，记录长度为4–6秒，这个时间周期称为“监听时间”。如果扫描长度为8秒，移动时间为8秒，两次扫描之间的时间间隔最少应为16秒（下页，下图）。因此，周期时间长短（两次连续扫描的时间间隔）是影响陆上地震队生产效率的主要因素。生产效率，即给定时间内记录的地震道数，可通过增加一组震源提高；采用两组震源激发时，第二组震源可在第一组震源扫描监听后立即开始扫描。这种方法称为交替扫描，是目前最常用的一种采集方式。

影响生产效率的另一个因素是采用常规记录系统记录地震道的记录长度。此类系统通常连续记录30–60秒后就必须停止记录，然后将记录的资料写到硬盘上。另一方面，提高震源施工效率也需要地震队能够加快布线速度。

近年来已研发出多项提高震源施工效率的技术，主要是部署多组震源，采用交替扫描的方法提高效率。这些技术大致可分为三类：级联扫描、同时激发和滑动扫描<sup>[10]</sup>。级联扫描消除了一个炮点扫描一次以上时两次扫描间的监听时间。

同时激发两组或多组震源几乎在同一时间产生正交扫描<sup>[11]</sup>。然后在处理阶段对同时记录的地震资料进行分别处理<sup>[12]</sup>。

滑动扫描采集过程中，第二组震源在第一次扫描监听后立即开始扫描<sup>[13]</sup>。这种重叠方式不同于同时激发，不需要震源车在炮点上同时做好准备。但是相邻扫描产生的谐波噪音可能相互渗透，影响记录质量。最近开发出了不少能够有效压制谐波噪音、分离地震信号、同时又不影响滑动扫描采集资料质量的方法<sup>[14]</sup>。某些采集技术可联合应用，进一步提高生产效率。

地球物理师一直致力于寻找能保证地震资料质量的最高效震源采集技术。一旦确定了采集参数，包括扫描

8. Bunting T, Bayly M, Tham M, McBride P, Daly M 和Barclay F: “Bookabourdie Q-Land\* 3D Proof of Concept Study; Mapping Sand Thickness and Sand Quality in the Cooper Basin”，发表在第20届ASEG地球物理会议上，澳大利亚阿德莱德，2009年2月22-25日。

9. 泊松比是一个弹性常数，衡量材料在垂向外应力下的压缩能力，用纵波速度和横波速度表示，随矿物组成和流体含量变化。

10. Bagaini C: “Acquisition and Processing of Simultaneous Vibroseis Data”，*Geophysical Prospecting*, 58卷, 第1期 (2010年1月) : 81-100。

11. 如果初始相位相差90°，两次扫描就会正交。

12. Stefani J, Hampson G和Herkenhoff ER: “Acquisition Using Simultaneous Sources”，论文B006, 发表在第69届EAGE会议暨展览会上，伦敦，2007年6月11-14日。

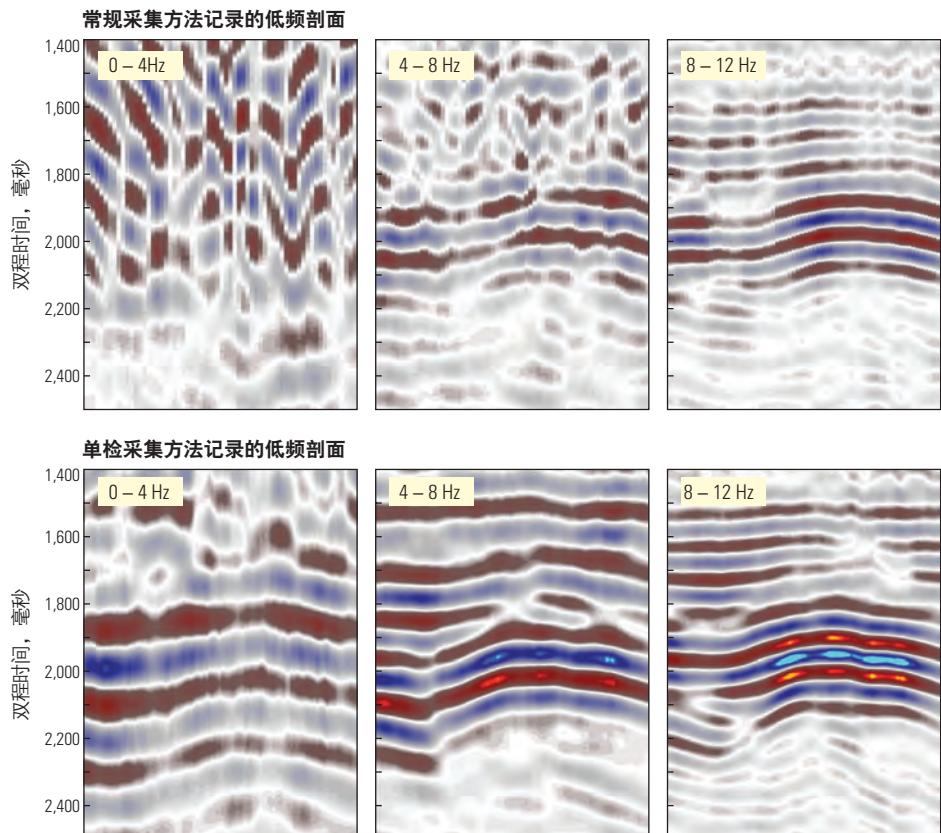
Moore I, Dragoset B, Ommundsen T, Wilson D, Ward C和Eke D: “Simultaneous Sources Separation Using Dithered Sources”，详细摘要，第78届SEG国际年会暨展览会，美国内华达州拉斯维加斯 (2008年11月9-14日) : 2806-2810。

13. Rozemond HJ: “Slip-Sweep Acquisition”，详细摘要，第66届SEG国际年会暨展览会，丹佛 (1996年11月10-15日) : 64-67。

14. Jeffries BP: “Method of Seismic Surveying”，美国专利第7050356号 (2006年5月23日)。

Bagaini, 参考文献10。

15. Bagaini, 参考文献10。



▲ 相干低频成分。通过比较单检采集方法与常规采集方法记录的系列带通剖面，发现单检采集记录到了相干能量（下）。虽然单检采集方法记录的带宽高于35 dB的信号主频为5.1–92 Hz，但还是记录到了0–4 Hz的低频成分，而常规采集方法没有记录。这部分低频成分有助于提高深反射层的成像质量。

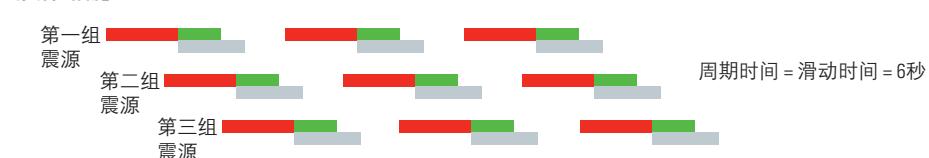
#### 单组震源车施工



#### 交替扫描施工

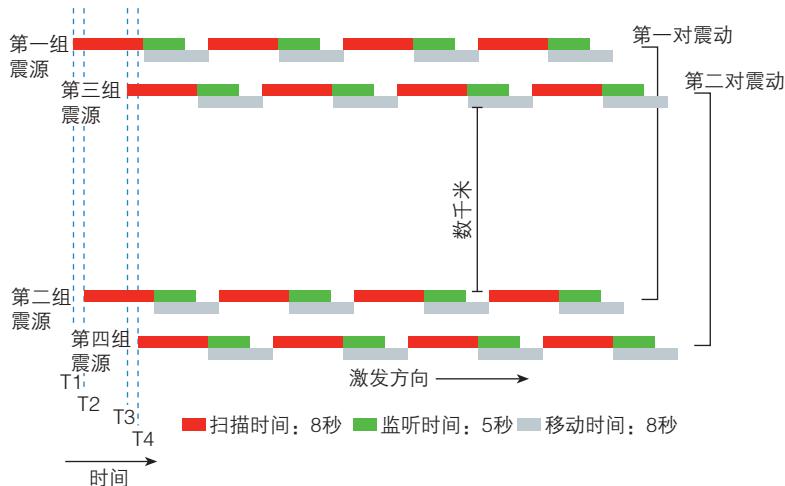


#### 滑动扫描施工



■ 扫描时间: 8秒 ■ 监听时间: 5秒 ■ 移动时间: 8秒 ■ 滑动时间: 6秒

▲ 提高采集效率。交替扫描（中）采集方法在完成第一组震源监听后立即开始扫描，因此完成一个激发周期的时间比单组震源短。单组震源采集和交替扫描采集的激发周期都决定于扫描时间。而滑动扫描采集（下），因为消除了监听后的等待时间，使施工效率大幅度提高。滑动扫描采集时，两个连续激发点之间最低允许时间间隔称为滑动时间。因此激发周期等于滑动时间，与扫描长度没有直接关系。但是，扫描时间长一般要求滑动时间也长，目的是避免连续扫描产生的谐波干扰有效信号。



▲ 两地震动滑动扫描采集。以短时、随意但已知时间分别让不同组震源震动。两对震动相隔数千米分别进行。最佳距离决定于目的层深度和炮检距。第一对震源组先振动，振动时间为T1和T2，振完后移到下一个炮点。与此同时，第二对震源组振动，时间分别为T3和T4。和滑动时间相同的滑动扫描采集方式相比，这种施工方式能将生产效率几乎提高一倍。也可以采用两组以上的震源进行振动式滑动扫描采集，但这种部署方式和常规方式相比，要求投入更多震源。

长度和激发次数，就可以确定每种技术在确保资料质量的前提下能够达到的生产效率。根据一项研究，对于给定采集参数，最高效率的技术和最低效率的技术之间的生产效率差一个数量级<sup>[15]</sup>。

但是，直到最近，即使是最有效的可控震源技术仍然因为叠加扫描影响资料质量。每一炮记录都被下一炮记录引起的噪音污染。利用斯伦贝谢研发的采集和处理技术不但能保证

震源生产高效率，还能保持采集的资料记录和常规采集的一样<sup>[16]</sup>。斯伦贝谢研发的两地震动滑动扫描采集技术能够有效管理同时采集造成的干扰噪音，然后在处理阶段有效消除噪音（上图）。因为分离后单炮记录的质量基本上和常规方法采集的资料质量一样，而且因为能采集到更多的记录，整体资料质量得到明显提高。利用该方法能够分离记录，消除干扰噪音，产生的最终资料质量和采用顺序

激发技术获得的资料质量差不多。

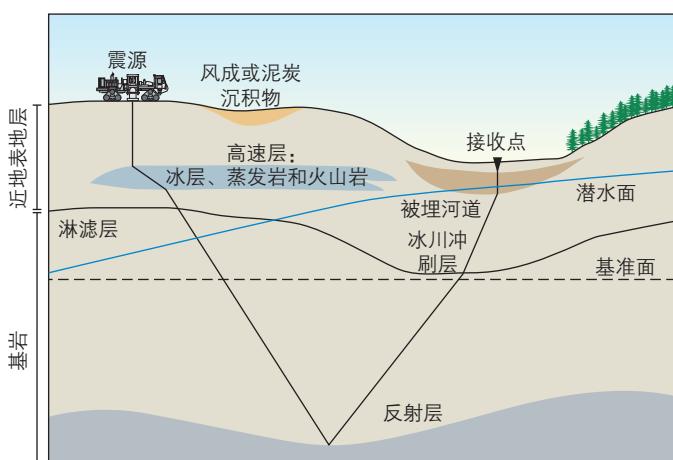
但要实现该技术的潜在效益需要UniQ系统提供几种支持技术，而这些技术常规采集系统是无法提供的。首先，要求连续记录，避免中间停止记录向硬盘写资料，提高采集效率。其次，连接多达150000道的活道，这样就可部署较宽的接收排列。因为采集排列部署在较宽的区域上，震源可在工区的远端工作，可以忽略采集排列的相互影响，从而有效提高生产效率。

### 解决复杂近地表影响

几乎所有陆上地震勘探都必须设法消除地表起伏和近地表非均质对地震资料的影响。浅地层可能因为多种因素造成地层物性在纵向和横向剧烈变化，如岩性、压实程度、胶结程度、风化严重性（左下图）。这些变化使地震波的到达时间延迟或提前。如果处理流程不考虑时间差，最终地震成像可能表现为低分辨率，深层出现假构造异常，交叉线间出现闭合差，噪音形成假同相轴。

可对地震道进行静态时移或常数时移，校正上述时差<sup>[17]</sup>。静校正的目的主要是将炮点和接收点放到近地表地层下的同一基准面上。各道的校正量与近地表异常的厚度和层速度有关。通常，利用折射法估算近地表平均层速度和层厚，建立速度模型<sup>[18]</sup>。但是，在某些复杂地区折射法技术不是很适用，例如出现速度反向（高速层在低速层的上面），采用典型震源勘探不使用钻孔。

当折射技术无效时，可利用面波建立近地表速度模型。面波是地球物理界常说的地滚波的主要成分，该波比地表震源激发产生的其他任何类型的波包含的能量都多，通常能覆盖有效纵波信号。之所以称为面波，是因为这种波沿地表传播，其振幅随深度减弱，一般速度较低，波长比纵波波长长。面波可能发散，说明面波波速与波长有关，长波长比短波长传播



▲ 近地表变化。地表高程和地下岩性及流体含量不同影响地震波的旅行时间。地震资料处理的目的是加上地震波在浅层构造中的传播时间，校正旅行时间，使激发点和接收点位于一个基准面上。

快，穿透得深。

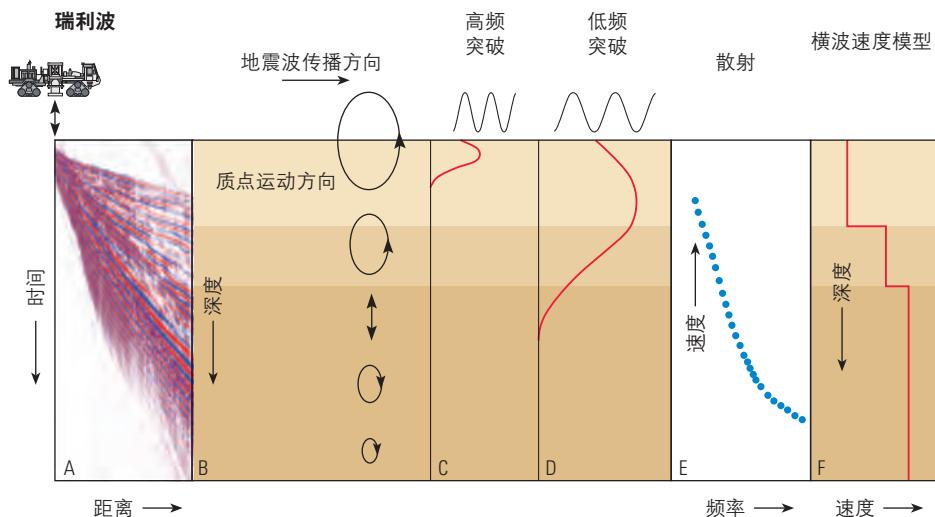
一直以来，地球物理勘探学家把面波看成是相干噪音。采用常规方法采集时，设计检波器组合压制面波。但用单只检波器正确采样，并对采集的面波进行分析，可从中获得近地表信息。地学工程师利用面波，特别是瑞利波（组成地滚波的纵波成分）研究浅沉积层的物性<sup>[19]</sup>。西方奇科的科学家将该概念应用到地震勘探领域，制定了面波分析流程，用于3D陆上地震资料处理（右图）<sup>[20]</sup>。按照这种方法，面波被看成是有用信号，从中提取近地表属性后再被消除。

对于指定勘探点，可能提取到瑞利波在一定频率范围内的传播属性。例如，可绘制相速度和波长的关系曲线，确定散射剖面（右下图）。在此基础上通过地震反演建立横波速度随深度变化的模型。然后利用测井信息或经验关系将横波速度转换成纵波速度。所得到的纵波速度模型作为静校正的输入资料。

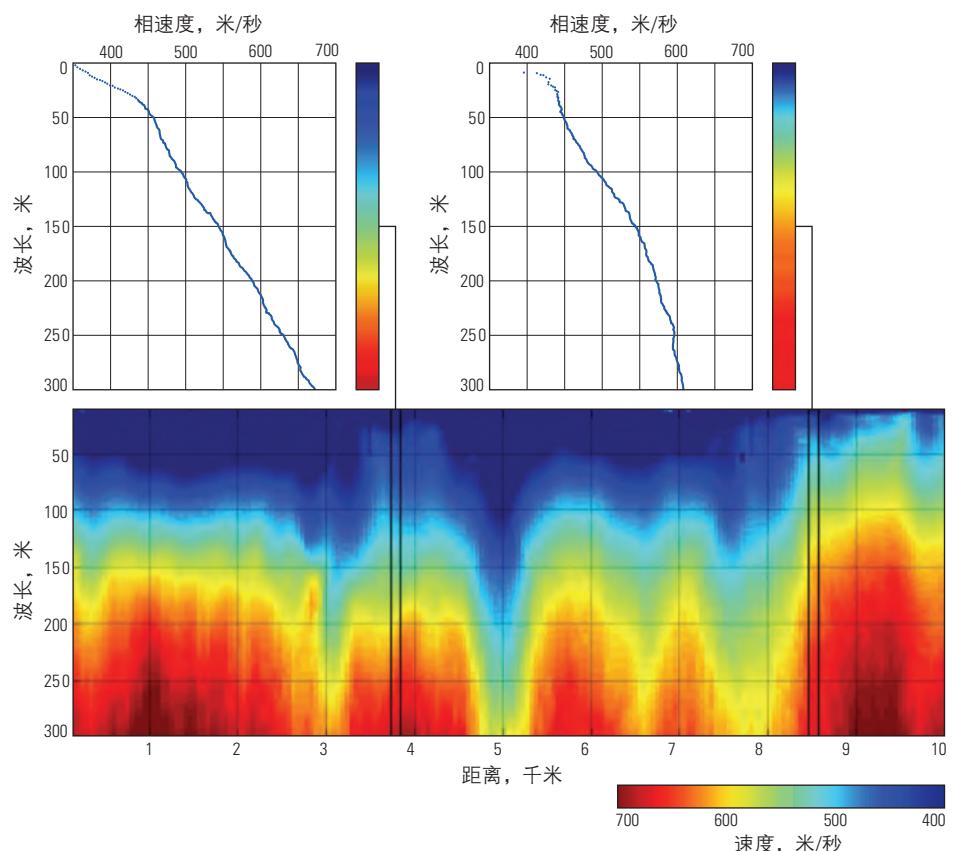
## 浅目的层

如果近地表包含目的层信息，就需要精确确定浅层构造的复杂性。科威特石油公司（KOC）在科威特北部油田就遇到了这种情况<sup>[21]</sup>。据说这个地区的油藏含有科威特境内最大稠油

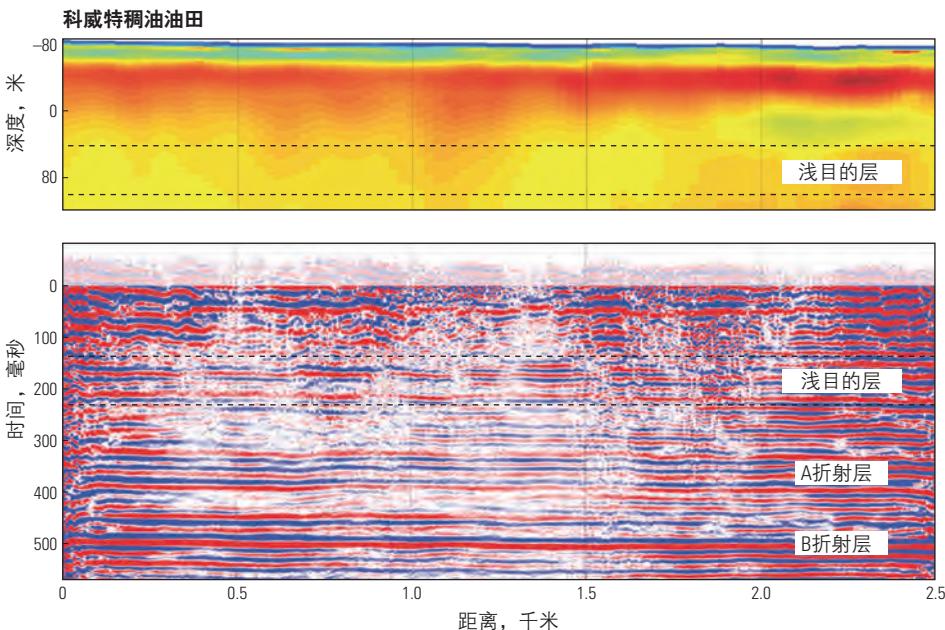
- 16. Bagaini C and Moore I: “Dithered Slip Sweep Vibroseis Acquisition System and Technique”，美国专利第20100085836号（2010年4月8日）。Moore等人在海上勘探方面提出了类似概念，参考文献12。
- 17. 对地震道进行不同时间的时移校正方法称为动校正，和静校正相反。关于校正方法的详细信息，请参考Marsden D: “Static Corrections – A Review, Part 1”, *The Leading Edge*, 12卷, 第1期 (1993年1月) : 43-49。
- 18. 折射法勘探采用沿地层界面传播的头波调查折射界面的深度、倾角和界面速度差。根据地震波从激发点到接收点的旅行时间，计算风化层的平均层速度。
- 19. Park CB, Miller RD和Xia J: “Multichannel Analysis of Surface Waves”, *Geophysics*, 64卷, 第3期 (1999年5-6月) : 800-808。
- 20. Strobbia CL, Glushchenko A, Laake A, Vermeer P, Papworth S和Ji Y: “Arctic Near Surface Challenges: The Point Receiver Solution to Coherent Noise and Statics”, *First Break*, 27卷, 第2期 (2009年2月) : 69-76。



▲ 瑞利波分析。瑞利波是地滚波的垂直成分，主要随震源激发产生，在单炮记录上表现为噪音（A）。随着地震波向右传播，地层质点经历椭圆形轨迹运动，和水波运动相似。地震波振幅随深度加深逐渐减弱（C）。因为包含低频成分的地震波比包含高频成分的地震波传播得深，因此通常传播得更快（D）。速度随频率或波长的变化称为散射。可通过反演散射特征建立横波模型（F）。



▲ 散射剖面。通过分析所有频率的瑞利波获得散射剖面（下）。以波长为纵轴，沿地震测线的距离为横轴绘制速度图，然后通过反演建立速度剖面。上图是两个重点分析点，表示不同波长对应不同的速度剖面。



▲ 近地表速度异常和深层成像。利用瑞利波反演得到的横波速度剖面（上）表明速度反向非常明显，高速层（红色）在低速层上面（黄色）。这张速度剖面被转换成纵波速度后，用于叠前校正。所得叠加剖面（下）质量较好，B折射层上面的浅反射层都能清晰成像。（根据Strobbia等人的资料修改，参考文献12）。

储量 – 覆盖面积1000公里<sup>2</sup>（390英里<sup>2</sup>），储量高达120–150亿桶（19–24亿米<sup>3</sup>）<sup>[22]</sup>。该油藏埋深特别浅，不足200米（约650英尺），而且特别薄，只有20米厚的砂岩层还被10米厚的页岩隔开。因为埋藏浅，使用稠油开采方法面临诸多挑战。

稠油油藏埋藏浅也给地震勘探增加了难度。通常认为目的层位在近地表地层中，夹在层速度发生了翻转的复杂层序中。一般通过静校正作平均处理的浅层构造的非均质性是了解油藏属性、确定油藏区块划分的精确信息。因为近地表沉积层衰减地震波信

号，所以要求加强激发能量，确保获得充分的信噪比，并采用小道距记录浅层成像所需的高频成份。

科威特石油公司选择了两个地方进行采集试验，采用单只检波器接收进行二维测量。采用不同强度的震源激发，如使用单台DX-80可控震源、非线性扫描、扫描频率3.5–120 Hz进行激发<sup>[23]</sup>。

采用两种方法计算近地表校正时间：一种是利用储层下的折射层进行常规折射静校正，另一种是把折射静校正和面波分析结合一起的综合方法。虽然两种方法获得的构造成像相

同，但只用折射静校正方法得到的地震剖面遗留某些与区域地质情况不一致的剩余倾角。而采用折射静校正和面波分析综合方法获得的地震剖面没有剩余倾角。

通过瑞利波散射剖面进行反演处理，得到的横波速度剖面出现明显的速度翻转（上图）。该速度差对比对应于沉积层压实程度或胶结程度的变化。叠加前用相关纵波速度对地震道进行校正，获得的反射层的分辨率较好。靠近B折射层底引起强反射的是第三纪的硬石膏和石灰岩地层，这种地层贯穿大部分科威特地区。

- 21. Strobbia C, El Emam A, Al-Genai J和Roth J: “Rayleigh Wave Inversion for the Near-Surface Characterization of Shallow Targets in a Heavy Oil Field in Kuwait”, *First Break*, 28卷, 第5期 (2010年5月) : 103-109.
- 22. Oskui GP, Al Naqi A和Dusseault MB: “Screening Potential Production Technologies for the Lower Fars Heavy Oil Asset in Kuwait”, SPE 126268, 发表在科威特国际石油会议暨展览会上，科威特科威特城，2009年12月14-16日。
- 23. Bagaini C: “Low-Frequency Vibroseis Data with Maximum Displacement Sweeps”, *The Leading Edge*, 27卷, 第5期 (2008年5月) : 582-591.
- 24. Strobbia等人，参考文献20。
- 25. Bird KJ, Charpentier RR, Gautier DL, Houseknecht DW, Klett TR, Pitman JK, Moore

TE, Schenk CJ, Tennyson ME和Wandrey CR: “Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle”, 美国地质调查局Fact Sheet 2008-3049 (2008年)，<http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/fs2008-3049.pdf> (2010年6月11日浏览)。

26. Colombo D, Mantovani M, Hallinan S and Virgilio M: “Sub-Basalt Depth Imaging Using Simultaneous Joint Inversion of Seismic and Electromagnetic (MT) Data: A CRB Field Study”, 详细摘要，第78届SEG国际年会暨展览会，美国内华达州拉斯维加斯 (2008年11月9-14日) : 2674-2678。

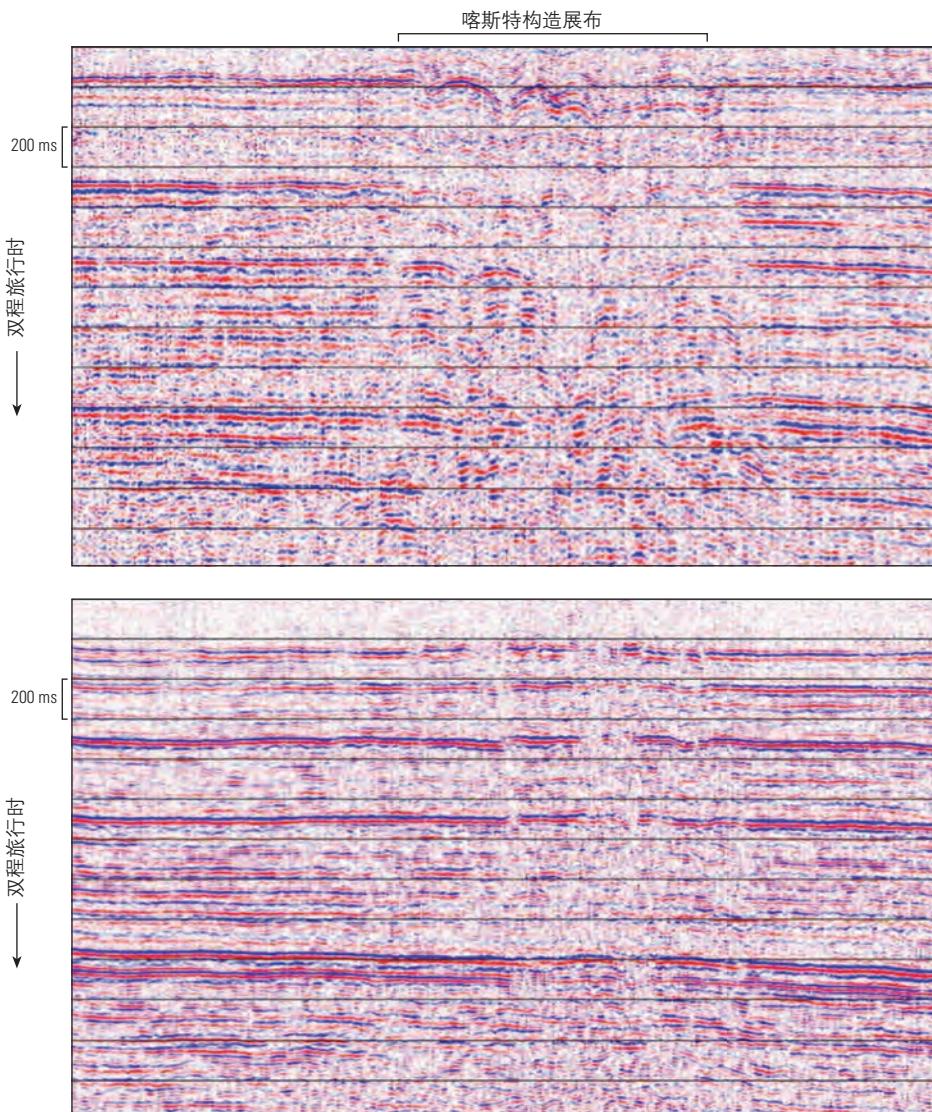
27. Colombo D, Cogan M, Hallinan S, Mantovani M, Virgilio M和Soyer W: “Near-Surface P-Velocity Modeling by Integrated Seismic, EM,

and Gravity Data: Examples From the Middle East”, *First Break*, 26卷, 第10期 (2008年10月) : 91-102。

有关TDEM更多的信息，请参见：Dawoud M, Hallinan S, Herrmann R和van Kleef F: “近地表电磁勘探”，《油田新技术》，21卷, 第1期 (2009年春季刊) : 20-25。

28. Colombo D, Mantovani M, Sfolciaghi M, van Mastrigt P, Al-Dulaijan A和Nafie T: “Near Surface Solutions in South Rub Al-Khali, Saudi Arabia Applying Seismic-Gravity Joint Inversion and Redatuming”, *First Break*, 28卷, 第2期 (2010年2月) : 77-84。

喀斯特地形是用来描述碳酸盐构造的一个术语，由于地表或地下水溶解，造成构造内部形成大孔洞，地貌呈不规则状。



▲ 补充重力勘探信息。浅层喀斯特构造使得地震波旅行时出现较大程度的扰动，而这种扰动无法完全用折射静校正进行解释（上）。通过在反演过程中加入重力勘探信息，减轻了地表不规则对剖面质量的影响（下）。（根据Colombo等人的资料修改，参考文献28）。

典型地震勘探认为这是近地表地层的底，在此之上的反射层和构造一般都不考虑。但这个地方储藏着浅层稠油资源，正是要开发的有利层位，采用折射静校正和面波分析综合方法成功获得了地震成像剖面。

除了建立速度模型用于计算近地表校正量，瑞利波反演结果还提供了储层及其周围构造的横波属性。这些成果对制定提高稠油采收率的生产计划很重要。

### 综合其他方法

提高陆上地震采集质量的方法丰

富多样，可以加强信号、衰减噪音、降低模型不确定性，也可以综合应用其他方法。例如，利用面波反演估算近地表层速度已经成功应用到北极地区的陆上地震勘探，在那里，永冻土层和季节性冷冻层导致纵向和横向地层弹性物性发生剧烈变化<sup>[24]</sup>。北极圈北部地区一直被认为蕴含着全球很大一部分剩余油气资源。2008年，美国地质调查局（USGS）估计北极圈未发现油气资源储量为原油140亿米<sup>3</sup>（900亿桶），天然气47.8万亿米<sup>3</sup>（1688万亿英尺<sup>3</sup>）<sup>[25]</sup>。其中15%以上的储量在陆上，但要想发现这些储量，需要进

行独特的高质量勘探。

也可以通过重力勘探和电磁勘探检测地下构造的属性变化。综合考虑重力、电磁勘探资料和地震资料进行反演处理能提高较宽范围内的地震成像精度。在美国华盛顿州哥伦比亚河谷地区，厚度高达10000英尺（3000米）的近地表玄武岩折射地震能量，通过综合应用地震资料和电磁勘探资料成功提高了埋深在16000英尺（4900米）以下的地层成像精度<sup>[26]</sup>。

综合应用各种资料也能改善近地表属性分析结果。西方奇科的地球物理专家在阿联酋用时间域电磁勘探资料（TDEM）计算高沙丘引起的静时移量<sup>[27]</sup>。他们利用干涉层底部的电磁属性高比差辅助绘制沙丘底，建立浅层速度模型。

重力资料提供的信息也已经应用于综合地震反演，结合地震资料用来计算静校正量，进行更深地层的成像处理。重力测量对测量点附近的地层密度变化非常敏感，因此重力勘探成为确定浅层非均质性的最好工具。重力勘探已在沙特阿拉伯成功应用，获得的重力资料记录表明浅地层密度和层速度受到Rus石灰岩中喀斯特构造的影响<sup>[28]</sup>。通过综合应用重力资料和地震资料进行反演模拟近地表属性，最终处理后获得了相当清晰的成像剖面，该剖面受近地表异常体影响很小（左图）。

随着越来越多的公司见证陆上地震勘探在提高地震资料质量方面取得的进步，并逐渐应用最新激发技术和采集技术，新方法新技术的应用范围将不断扩大。在以前因为地震成像不足而受到影响的许多地区，以后可以采用新型勘探方法，无论是记录其他类型的地震信号，还是应用其他类型的物理方法，都有希望提高勘探质量。

- LS