

## 给地球做“CT”

人类有一个“毛病”，总想窥视物体内部的结构。用大刀切开一个西瓜，绿皮红囊黑子的排布就一目了然了。人体不是西瓜，不可随意切开，因为碰一碰肉体中的神经，也常常令人痛苦难堪。对人体结构的了解，自古以来多依赖对尸体的解剖。对活体呢？中医用手指号脉、西医用听诊器听音，以窥探体内心脏及血管系统的健康状况。当然，现代科技已经可以不通过直接接触人体就能无痛地探测出体内的微细结构如血管、息肉、肿瘤等等，例如十分普及的“CT”技术，是“Computerized Tomography”的缩写，即“计算机断层扫描术”。CT诊断就用X射线扫描人体来获得大量的数据，通过计算机复杂且大量的运算，把X射线形成的影像绘制在一张“断层”上，让肉眼能够识别活体切面上的细微结构以及变异情况。

与人体相同，地球在可见光下同样是不透明的“黑物体”。中国有“穿山镜”的传说，总希望能够窥视地球内部的结构。从给人体做CT的科技获得启示，类似CT技术也可以窥视地球的内部结构。但地球与人体不同。人体小，在通常的CT仪器中均可以进行各方向的三维立体扫描，而对地球的扫描只能在地表进行，属平面的二维扫描。所以，给地球做CT更加困难，更需要“黑科技”。基于CT技术相似的原理与思路，把X射线这一电磁波换成由物体振动而产生的弹性波（如声波），并基于更强大的计算机计算技术，1975年出现了“斜向地震反射偏移剖面计算机成像技术”，奠定了地震层析成像的基础，能够通过地震勘探的方法，绘制出地下斜向地层的结构，用于寻找石油天然气矿藏。

### 我们用什么窥探地球

地球物理，顾名思义，就是利用物理原理来研究地球。地球物理人最喜欢的就是跟医学CT做类比来解释自己的工作性质，的确如此，地球物理探测跟医学探测人体具有很多相似点。首先简单回顾一下医学CT的工作原理，它向人体发射一束X射线，人体的各个组织对X射线吸收能力不同，因此同一束X射线再透过人体不同之后就发生了不同程度的改变，这时候再将这种差异性改变转化成我们易于解释的图像即可用于诊断了。我们地球物理也是利用地球内部结构的物理属性差异来研究其内部构造的，也就是利用我们的仪器设备给地球做“CT”。



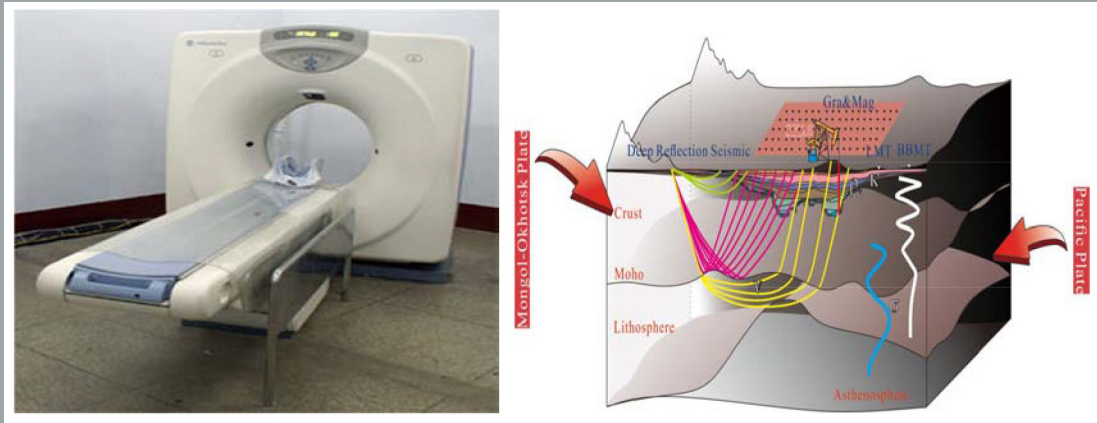


图 1 医学 CT 与地球物理

## 我们怎么给地球做“CT”？

地球物理所能分辨的物理属性主要是那些呢？经过近百年的发展，人们发展了一系列地球物理探测方法，这些方法针对地球内部的密度差异、磁化率差异、速度差异以及导电性差异等，分别对应重力勘探、磁法勘探、地震勘探以及电法勘探这些常用的地球物理探测方法。其中，重力、磁法和电法方法考虑地下介质的整体效应，而地震方法主要针对速度、密度结构变化的突变界面，且具有更高的分辨率。

那么这些物理属性差异怎么跟地球深部结构对应起来呢？首先我们需要将深部构造的地质问题转化成地球物理模型，在这些模型中，地质现象将被上述物理属性所表征。联系上述地质与地球物理问题的纽带就是岩石物性。我们的地球由各种各样的岩石以及包含在岩石中的流体所组成，每一种岩石，包括每种岩石在特定的温度、压力条件下都有其对应的物理属性参数，这是地球物理方法用于区分不同介质的基础。当然，这些物理属性并不是一一对应的，同样的物理属性可能代表不同的岩石以及不同状态下的不同岩石，这就是地球物理探测多解性的根源，因此需要结合多种地球物理探方法进行判断，多数时候还需结合地质以及地球化学资料来进行判断。

## 疑难杂症，我们都能看

首先，深部地球物理研究认识地球的圈层结构。目前流行的地球模型是将其分为三个基本圈层：地壳、地幔和地核。这个三个基本圈层又可以进一步细分，如地壳可分为上地壳（纵波速度， $V_p=5.9\sim 6.3\text{km/s}$ ）、中地壳（ $V_p=6.4\sim 6.7\text{km/s}$ ）

和下地壳 ( $V_p=6.8\sim 7.6\text{km/s}$ ), 且其具有明显的物性差异。总体上, 地球内部随着深部的变化, 其物理属性参数呈现递变变化, 但又存在明显的属性突变界面(图 2), 如莫霍面, 地球化学研究认为其为岩石的相变界面, 在地球物理上主要表现为速度和密度的突变界面, 其速度突变到  $8\text{km/s}$  以上, 密度突变到  $3\text{g/cm}^3$  以上。与此同时, 还存在明显壳内低初速层 ( $V_p<6\text{km/s}$ ) 和壳内高导层, 且通常具有对应关系。在这些物理属性突变界面通常能够观察到明显的地球物理异常(图 3), 其中电法和地震法纵向上比较敏感(深度方向), 其异常明显, 而重磁方法则不容易观测出深度方向的物性变化。我们将这些观测异常与岩石物理属性结合起来, 就可以解释地球内部的圈层的变化特征了。

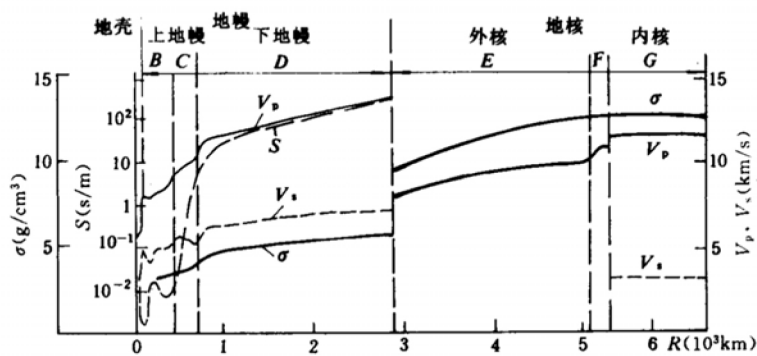


图 2 地球不同深度的物理属性

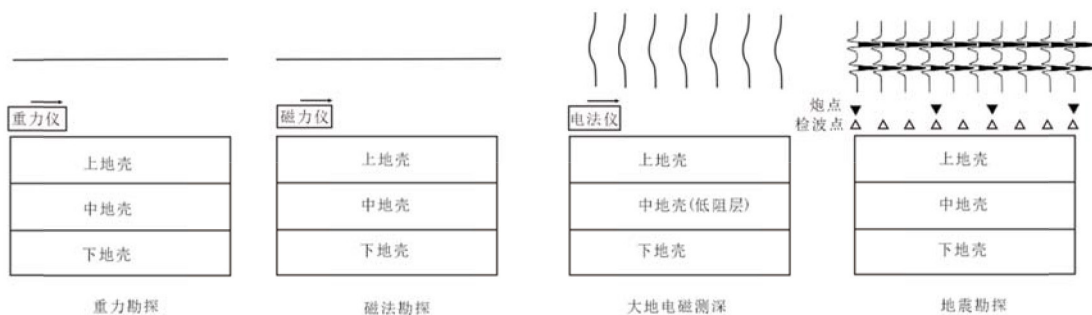


图 3 圈层结构地球物理异常示意图

同时, 深部地球物理聚焦于地球的横向不均匀性。研究表明, 我们的地球并非完全的圈层结构, 同一圈层在横向上物质组分、状态也会存在差异, 就像我们的地表既有高山平原, 又有江河湖海一样, 这种明显的差异反映了地球的演化过程。我们常讨论的板块的运动就是一种横向不均匀性, 不同的板块具有不同的演化历史和物质组分, 当其在构造运动中拼贴在一起时, 其缝合线两侧具有明显的物性差异。最明显的就是大陆板块和海洋板块的界限, 后者通常呈楔状插入到大陆板块之下。大洋地壳通常为硅镁质地壳, 其速度和密度相对于大陆的硅铝质地壳要高, 两者存在明显的物性差异, 地球物理方法在跨越不同地体两侧进行勘测过程中, 会得到明显的观测异常(图 4)。



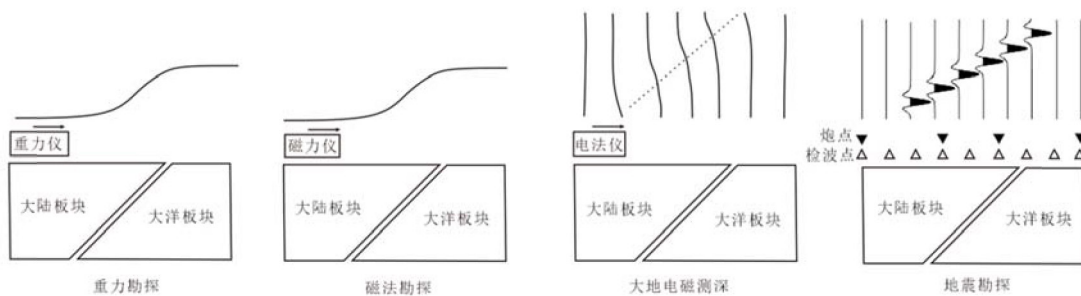


图 4 不同块体拼合的地球物理异常示意图

另外，深部地球物理还会讨论深部局部异常。局部异常也是地球内部演化的产物，以一个深部岩浆囊来举例说明，岩浆囊主要是一些熔融物质，通常来自于可能更深层，其密度和速度通常高于周围的岩石，且可能具有磁性，其导电性一般较差，因此表现为高速、高密度、高电阻率、高磁性的异常体。在地球物理探测中，每一种方法都是针对其中的某类属性，得到这种属性的剖面图或者曲线图（图 5）。

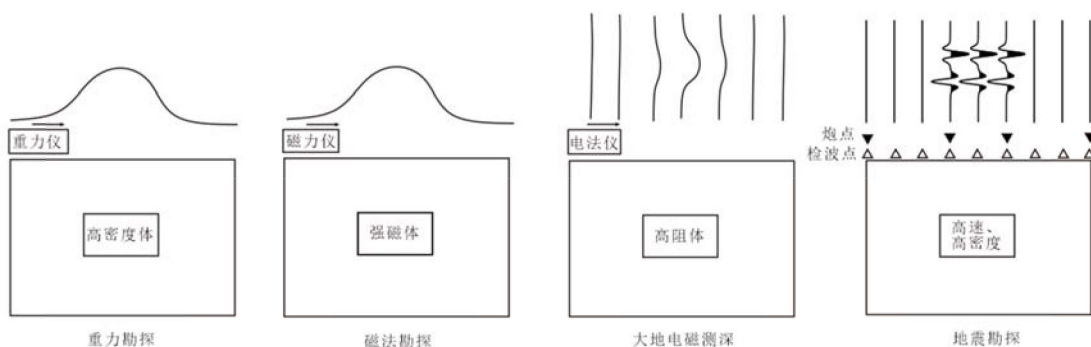


图 5 局部异常的地球物理响应示意图

上述过程讲的是地球物理正问题，即什么样的地球深部结构对应什么样的地球物理异常。而我们地球物理研究地球深部结构则是反问题，即通过观测异常推断深部结构。这就需要我们综合考虑各项参数，将观测到的地球物理异常结合地质与地球化学资料进行综合分析。同时，还需要提高对地球物理观测数据的利用率，使得观测异常转化为直观与精确。

目前，我国给地球做 CT，让地球成为“透明地球”，不仅有地震层析成像法，还有电磁波层析成像法，不仅应用于石油天然气等能源矿产勘探领域，而且还应用于金属矿产、非金属矿产、水汽矿产勘探领域，为我国矿业的发展做出了巨大的贡献。

供稿：中国地质科学院地质研究所 符伟，侯贺晟，杨璠，国瑞