

杨文采——地学研究中的精彩跨界

◎文 / 曹菲



杨文采（1942年10月3日~），地球物理学家。广东省大埔县人。1964年毕业于北京地质学院地球物理勘探系，后进入原地质部地球物理探矿研究所从事固体地球物理学研究。1981年公派赴加拿大麦吉尔大学进修，考取该校地质科学系研究生，1984年取得麦吉尔大学地球物理博士学位。学成回国后任原地质矿产部北京计算中心高级工程师，同时应聘在北京大学和同济大学讲授“地球物理反演方法”研究生课程。1992年调任中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所所长，创办国家现代地质勘查工程中心并兼第一任主任。1996年调任中国地质科学院地质研究所研究员，后任中国大陆科学钻探工程中心副总指挥，地球物理子工程负责人。1997年兼任中国地质大学（北京）教授和博士生导师。2005年当选为中国科学院院士。2008~2013年任第十一届全国政协委员。

杨文采院士给人的第一印象，与其说是科学家，毋宁说是文人。举手投足间的文人气质，让他在科学家云集的中国地质科学院显得与众不同。这个印象，在读他的随笔《千年流觞如诗如画》时，能得到佐证。身为地质学家，杨文采又一次成功跨界，书中描写的都是地质之外的事情，抒发的是看古今、想趣事、思现世、爱生灵的人文情怀。

正如他的名字，他是一个有文采的人；而他写就的地质文章，当然更加文采飞扬。

第一次跨界：艰深的数学知识应用到地球物理中去，完善了“地球物理反演”理论

从文学跨界到地质

杨文采1942年出生于广东大埔，初中时立志要当一名作家。没想到，文学家高尔基的一句话，反倒改变了他的志向。高尔基有句话的大意是，作家大都是以丰富的阅历和广

博的知识作为基础的。所以杨文采觉得，必须读万卷书、行万里路，始能到达成功的彼岸。按照这句话的指引，高考填报志愿时，杨文采填报了北京地质学院。在他看来，学地质、搞地质就意味着“行万里路”。

五年的大学生活，让杨文采各方面都大有长进。“进大学的时候我17岁，只有70来斤，1.50米。走出大学的时候我1.76米，120多斤，成了一个有知识、有思想的人。”

1964年杨文采大学毕业，意气风发，但两年后却爆发了“文革”，最好的时光消耗在了无尽的政治运动中。令人敬佩的是，身处逆境，他没有放弃科学信念，身边不少人都去搞针灸、做木匠了，但是他始终没有丢下专业。

1981年，当改革春风吹起的时候，杨文采迎来新的机遇，大学毕业17年之后，考取了教育部公派访问学者，到加拿大麦吉尔大学攻读博士学位。

此时，杨文采已届不惑之年。

邂逅“反演”

此前，杨文采在中国地质科学院物化探所工作，已经小有成就。他设计、制作了RM-1型物探多用电阻网模拟计算机；提出了重力和地磁异常在频率域的解释理论与方法。但面对敞开的国门，看到外面的世界，他觉得“自己的知识需要更新了”。

留学加拿大的3年需要克服的困难可想而知，但杨文采迎难而上，争分夺秒。不但学习地球物理，还坚持到数学、计算机等专业去听了9门功课。让人意想不到的是，在他出国留学最艰苦的30个月当中，竟然把金庸的小说全部看了一遍。“为什么看了一遍呢，因为那个生活实在太苦。实在太烦闷的时候，就看金庸的小说，就看那主人公在深山里头，掉到深沟也要在里面修炼，他怎么能坚持下来。”

这30个月里，还有更加意外的收获。在此期间，他专攻了奠定他科学地位的“反演”。

地球物理学是通过观测数据来解释地球内部组构的学科。杨文采用通俗的语言解释了“反演”这个概念：“人类对自然事件的发生、发展和演变的观察在时空上是非常局限的。例如，人类只有几百万年的历史，而地球存在了至少46亿年，没有人能看到青藏高原的隆起或白垩纪恐龙的灭绝过程。在空间上，地球表面为坚硬的岩石所覆盖，没有人能看到15千米以下的岩石是什么样子。我们只能根据人类所能感知的极有限的信息来反推地球内部以及地球历史上的其他不可见的部分。这种反推的过程就被称为‘反演’。总之，‘反演’是一门关于扩大人类知识领域、指导人们正确地逆向思维的学问。”

他进一步举例说：“如果放一小瓶香水到小房间中央，从扩散方程可知，一天之后小房间内将布满大致均匀分布的香水分子，



1968年8月，杨文采在青海德尔尼矿区野外工作

这就是正演的问题。反演的问题是已知屋子四周的香水分布，要问：何时何处放的香水，或放香水的瓶子是什么形状的。我们不禁要问：这些反过来问的问题，在数学上有没有解答？解答是否不唯一？如果解不唯一，哪个解才是真实可靠的？这些问题，就构成了反演理论的主要研究对象。”

在认识地球的过程中，地球物理反演起到了关键的作用。人们在地球表面观测地球的物理场（如引力场、磁场、电磁场等）和地震诱发的弹性波场，然后根据观测数据推测地球内部的岩性与构造，这就是地球物理反演。

发展“反演”

在留学的时候，杨文采意识到研究反演算子（或称为逆算子）的结构、性质和数值计算的可靠性有可能促进勘探地球物理学的发展。当时，勘探地球物理是按方法划分的，包括地震勘探、重力勘探、磁法勘探、电磁

法勘探等分支学科，每一种方法都有自己的一套仪器与数据处理解释方法，相互不搭界。亟须一种能适用于各种方法的、统一的反演理论。

1984年回国后，杨文采应聘在北京大学和同济大学讲授“地球物理反演方法”，并且继续从事应用地球物理学中反演方法的研究。杨文采第一次建立起一套可以适用于各种地球物理勘查方法的统一的反演理论框架和一整套广义线性反演方法。同时，他把地震学反问题求解方法的适用范围从微扰的条件拓展到非微扰的条件，提出适用于大扰动和非水平层状介质中的声波方程反演方法与地震波速成像方法和跨孔地震层析成像的级联法。他还从混沌理论出发，探索了非线性地震反演的规律性。同时，他应用混沌理论科学地定义了非线性地震反演的控制参数，明显提高了地震反演的分辨率，开拓了非线性地震反演的方向。

1989年，他的专著《地球物理反演与地震层析成像》获地质矿产部科技成果奖二等奖，成为北京大学、同济大学等高校研究生教材或主要参考书。他还应邀在第20届国际声成像学术报告会上做非线性地震反演的特邀报告，在德国联邦地球科学和自然资源研究院（BGR）等3家院校专题报告有关反演与地震层析成像理论，美国《计算物理》等学术期刊多次约请他审阅有关反演的稿件。

应用“反演”

杨文采不仅发展了地球物理反演系统理论与新方法，并致力于将此理论与方法广泛应用于油气与矿产勘查及重大建设工程勘查。在应用中，他特别关注和推崇极少数理论上具有唯一解的反演问题。地震层析成像就是典型。

20世纪80年代，他研究出基于弯曲射线追踪的跨孔CT方法，指导了黄河小浪底水利枢纽工程地下电站基础的层析成像，计算出了准确的波速层析图，为后续工程所验证，为地震层析成像工程勘查中的应用做出了示范。

1991年，小丰满水电站年久失修，大坝出现病害，需要修复。日本工程人员采集了数据，但没有能圈出病害的部位。杨文采针对传统地震CT算法的缺陷与工程地震的特点，研究出改进的阻尼最小二乘QR分解算法，大大提高了地震层析成像方法的精度与稳健性。用这种方法指导小丰满水电站大坝病害检测，圈定了大堤病害的范围。

1994年位于长江口的上海排污管破裂，作为顾问的外国专家束手无策。当时所里的工程师拿着杨文采的论文去投标，结果中标，做出了排污管破裂层析图。他还解决了冀东油田储层跨孔地震层析追踪，北京机场高速路立交桥墩质量监测等一系列疑难工程，把地震层析成像迅速推



1996年8月，杨文采（左2）在办公室和德国地球物理专家讨论反射地震

向实用。1990年，他应中国工程勘查协会的请求，为地震层析成像工程应用编写了规范性手册。

在应用地球物理学中，石油反射地震勘探是领先的高科技。20世纪80年代后期，

地震方法技术面临直接用于描述油气储集层以指导油气藏开发的挑战。杨文采在国家自然科学基金委地学部与哈尔滨工业大学介绍有关油储地球物理的原理及内涵，促进了国家自然科学基金委“八五”重大项目“陆相薄互层油储地球物理学理论和方法”的立项。项目启动以后，他应用非线性反演理论，开拓了基于混沌反演进行油气储层追踪的方法技术，在大庆油田等地区获得广泛应用。针对油气田开发后期含油层为含水层包围等情况，他提出了改进的跨孔地震层析成像新方法，为地震层析成像在油气田开发中的应用提供了范例。

第二次跨界：把信息科学应用到地球物理中去，开拓了地球物理信息提取理论的研究领域

杨文采说，自己17岁进大学学微积分，从此就“钻进了牛顿先生的圈套”，“上了牛顿的当”，从数学方程到物理定律，从物



1981年夏，杨文采（右2）在加拿大麦吉尔大学和加拿大师生一起出野外

理定律再到地球演化，走认知的路。认知的路苦乐参半，绞尽脑汁是苦，解开谜团是乐……

地质学家们打交道的大多是石头，与其他地质学家有些不同的杨文采，打交道更多的应该是公式。那些抽象的公式是反映自然行为的内在规律，让大多数人看不见摸不着，却时时处处显示着威力。杨文采为了地球科学，孜孜不倦地与这些公式玩着苦乐参半的游戏。

如果说发展地球物理反演理论是他的第一次跨界，他对地球物理信息提取理论的研究，则是他把信息科学运用到地球科学的第二次跨界。

早在 20 世纪 70 年代，杨文采就致力于调和分析和数字滤波的研究。他解释了令笔者困惑的专业术语。调和分析是研究如何把复杂的信号分解为简单的信号的叠加。频率



2004 年，杨文采在内蒙古考察玄武岩露头



1998 年，杨文采（右）与国际大陆科学钻探计划职委会主席艾默曼教授（左）交谈

域解释方法指的是把随时间变化的信号分解成不同频率的信号叠加，然后研究各个频率的信号是如何分布的，并用它的分布性质进行反演。它们的基础是傅立叶级数和傅立叶变换。他提出了重力和地磁异常在频率域的解释理论与方法。

1981 年，杨文采在加拿大地球物理联合会年会上做了重力和地磁异常频率域解释理论的报告，为他顺利转为博士研究生并取得资助奠定了基础。20 世纪 90 年代他和研究生侯遵洋博士首先用二维小波变换和多尺度分析方法进行了中国重力异常的多尺度分析。这种方法应用于塔里木等多个油气盆地的深部构造分析，取得良好效果。2000 年他应邀赴澳大利亚介绍有关成果，并以澳大利亚的数据示范了多尺度分析方法的优越性。2011 年后他指导博士研究生孙艳云应用位场谱矩理论等新的信息提取法，创新了地壳变形带信息提取的方法。该方法用于中国多个区域的地壳变形带信息提取，推动计算机识别地壳构造和自动成像前进了

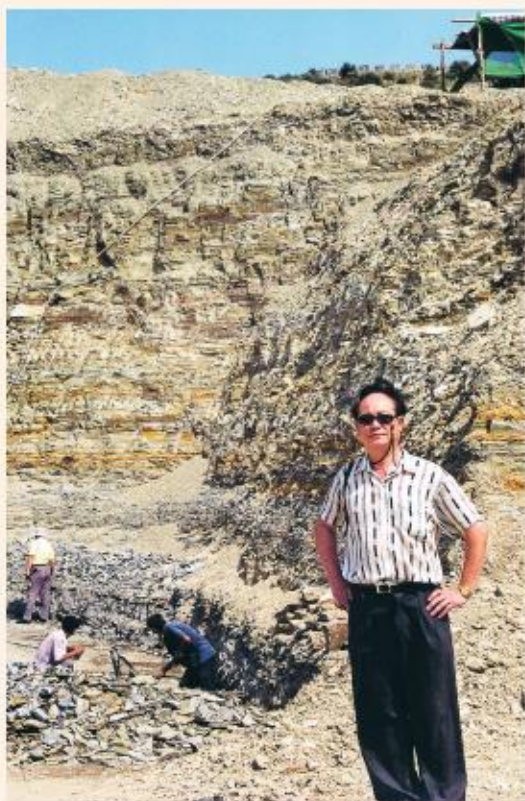
一大步。上述三方面研究成果在国内外专业刊物发表之后引起广泛反响。2016 年 6 月，他与多位院士共同主持了“中国深层油气藏”香山学术研讨会，并做了主题发言，公布了他用高阶谱矩理论对中国深层油气田分布的预测成果。

第三次跨界：大陆科学钻探计划，使得他的物理学与地质学走到了一起，开展了大陆动力学的深入研究

中国大陆科学钻探

杨文采的名字被公众熟知，源于亚洲第一科学钻井——中国大陆科学钻探工程。这个位于江苏省东海县的科学钻井，是中国和亚洲第一科学钻井，而他是中国大陆科学钻探工程副总指挥。

这个项目的前世今生，还得从 20 世纪 90 年代末说起。当时，大陆科学钻探事业的开创和发展成为全球地学界的焦点之一，1996 年国际大陆科学钻探计划（ICDP）成立，



2001年，杨文采在辽西地质考察

邀请杨文采担任 ICDP 第一届科学顾问组成员。1997年初，他与许志琴院士等7位中外科学家一道提出举世瞩目的中国大陆科学钻探项目。那年4月，在德国召开的 ICDP 科学顾问组会议上，同时出现两份在超高压变质带进行科学钻探的建议书，一份来自中国，另一份来自美国，要在哈萨克斯坦打钻。杨文采在会上的发言深刻阐释了中国申请的潜在科学意义，这一发言改变了与会专家的看法。投票结果，中国的建议获得认可，得到150万美元的资助。

同年8月在青岛召开的“大别—苏鲁超高压变质带大陆科学钻探选址国际研讨会”上，杨文采以准确的地球物理资料与深入的科学分析，论证了大陆科学钻探的最佳选区，得到与会中外专家的赞同。在中国大陆科学钻探工程的先行研究中，他提出了以 X 平方分布作为地震剖面优化的新处理准则，并据此建立了深反射地震资

料处理新方法技术系统，建立了中国第一个深反射地震资料处理中心。

2001年，科学钻探计划得到国家批准，他设计和负责实施了我国结晶岩区首次三维和数字三分量反射地震调查，提交了高质量的深反射地震剖面和三维数据体，为大陆科学钻探孔区地质构造研究提供了优质资料。他结合物理学和地质学的理论与方法，对中国第一口大陆科学钻探主孔区的岩性、构造进行了预测，基本上为后续的钻探工程所验证。而在大陆科学钻探的历史上，地球物理学家预测成功率不高。举世闻名的前苏联科拉超深钻与德国KTB，钻前地球物理学家的预测都曾失败过。

大陆科学钻探实施的几年里，他和同事们发表了70多篇跨学科论文，应邀到世界地质大会、深海钻探计划年会等会议做特邀报

告，还被聘为在巴西召开的第31届国际地质大会K13专题召集人。

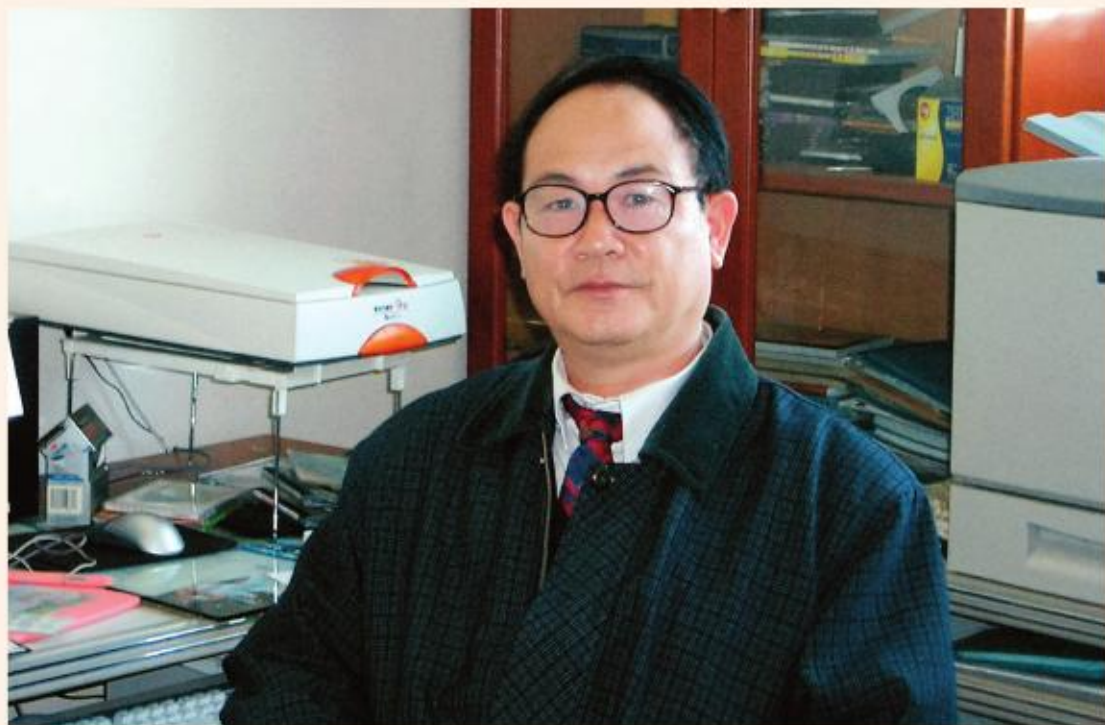
2005年3月，中国大陆科学钻探工程终孔，历时1353天，进尺5158米，取得了钻探工程技术的重大突破，获得了许多创新的成果和重大科学发现。

地壳三维成像与大陆动力学作用过程的研究

进入21世纪，地球探索已经进入区域大面积性调查的新阶段。多波地震波速/泊松比层析成像、位场多尺度分解和密度结构成像和大地电磁三维电阻率成像方法技术体系，使区域低成本地壳构造的三维成像成为可能。沉积盆地是石油、天然气、煤、铀和钾盐等矿产汇集的主要场所，塔里木盆地的主力生油期在古生代，尤其是早古生代，特



2004年9月，杨文采在藁县国家地质公园中新元古界景区考察



2003年，杨文采在办公室里



2004年11月，杨文采（左3）在东海中国大陆科学钻探现场向来宾介绍钻探进展情况

大型油气藏如果存在，埋藏大都深达5~10千米。由于深层钻探成本非常高，没有高度准确的地球物理定位方法和技术，是不可能取得成功的。在塔里木盆地对油气藏定位成为

最新科技水平较量的场所。

近年来，杨文采在油气及能源方面以及板块构造与大陆动力学发展战略研究领域、塔里木盆地地壳结构和油气密集区定位的研

究中收获显著。

在中国石化和中国地质调查局资助下，他运用三维地壳成像方法，进行了塔里木全盆特大型油气藏远景区的定位研究，把塔里木特大型油气田的目标远景区缩小为6个，提出了6个深层特大型油气藏的靶区。这个项目2015年以“优秀”评价通过验收，在石油地质界取得广泛影响。

2013年他和张国伟院士共同发起了“板块构造与大陆动力学”学科发展战略咨询研究。他由此发表的10多篇论文，扩充了板块构造的经典理论“威尔逊旋回”的理论框架。

“多考察一个地区、多想通一个问题、多感悟一条规律，人生就多一份价值。”这是杨文采的人生信条。面对成绩，他始终保持一颗淡泊的心。对他而言，能够更进一步了解板块构造与大陆动力学的规律，有效开发地下资源，支持人类可持续发展和国家需要，比什么都重要。虽然开玩笑说上了牛顿的当，但牛顿无疑是他终身的科学偶像：“牛顿先生在教我如何通过演绎和分析去认知宇宙的同时，也让我体悟到生命价值所在，乃是用短暂的有生之年尽可能多地去认知世界。”

所以，年过古稀的杨文采院士，依旧天天在思考着与东亚有关的大陆动力学问题。他希望在有生之年以丰富和复杂的东亚地壳探测成果，总结出关于地球动力学作用过程的理论框架，使地质科学成为一门先进的现代科学。他认为，地壳三维物理性质的成像并不是科学研究的目的，而把探测结果揭示的地壳信息与地质测年成果结合起来，找到元古宙以来地壳演化的规律才是研究的最终目的。