

滕吉文. 2021. 高精度地球物理学是创新未来的必然发展轨迹. 地球物理学报, 64(4): 1131-1144, doi: 10. 6038/cjg2021N0100.

Teng J W. 2021. High-precision geophysics: the inevitable development track of the innovative future. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(4): 1131-1144, doi: 10. 6038/cjg2021N0100.

高精度地球物理学是创新未来的必然发展轨迹

滕吉文^{1,2,3}

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 吉林大学, 长春 100044

摘要 地球物理学在整个地球科学研究与探索中占有重要地位, 突破该领域以描述、推断为主体的框架, 并逐步向量化或半量化前进确为必然. 地球物理学逐步向高精度升华乃深化理解各有关科学问题的时代需求. 基于物理学概念, 从定义出发促使多学科交叉和不断创新, 是地球物理学能否抢占地球科学制高点的核心所在. 为此, 真正意义上的高精度观测、高分辨率的数据采集和精细结构的刻画构成了高精度地球物理学的基石, 是深化理解地球科学中有关壳幔形成、演化问题的深层次的内核. 本文通过较系统地分析和研究提出, (1) 地球科学研究进程中的定性描述和依据于浅表层过程与现象的推断有待突破; (2) 夯实与把握基础科学理论是高精度地球物理学捕获真谛的“钥匙”; (3) 高精度地球物理学是深化认识地球本体和逼近彼岸的基石!

关键词 高精度地球物理学; 多学科交叉; 科学理念; 科学真谛; 发展轨迹

doi: 10. 6038/cjg2021N0100

中图分类号 P315

收稿日期 2019-03-12, 2020-05-26 收修定稿

High-precision geophysics: the inevitable development track of the innovative future

TENG JiWen^{1,2,3}

1 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3 *Jilin University, Changchun 100044, China*

Abstract Geophysics plays an important role in the research and exploration of Earth sciences system, it is inevitable track for geophysics to break through the framework that is mainly based on desperation and deduction, then gradually heads towards to semi-quantization and quantization. Therefore, it is the demand of the times for geophysics to improve its precision to deepen the understanding of relevant scientific problem. Based on physical concept and its definition, the core issues of whether geophysics could control the commanding point in Earth sciences are continuous innovation and facilitating interdisciplinary. Hence, a truthfully high-precision observation and data collection, the acquisition of fine structure are not only the footstone of high-resolution geophysics but also the deep-seated gist of further understanding the formation and evolution problems of the crust and mantle in Earth sciences. According to systematically study and analysis, we suggest that (1) the qualitative description and the dependence of shallow layers process and phenomena should be overfulfilled. (2) The key of capturing the truth with high-resolution geophysics is to solidly grasp basic science theories. (3) High-precision geophysics is

the footstone of our destination to further understanding of the Earth.

Keywords High-precision geophysics; Multidisciplinary; Scientific concepts; Scientific verities; Development path

0 引言

近年来,在我国的报刊、报道、科学研讨会上出现了一些新名词,即“精准医学”、“精准大气物理”、“精准构造”、“精准地球物理”……等。“精准”就字面而言是表征精细和准确的意思,即量化的,且似具有“终极”之意,它是一个标量。在科学与技术发展的历程上,伴随着科技的进步,对某种现象、问题的理解和认识是逐渐深化的,即永远是向真谛逼近的过程,这对地球科学来讲的确离“精”、“准”还有相当漫长的路要走,更需不断深化的时序与不断创造。为此,高精度地球物理学的命题应更为适宜,因为高精度是一个不断提升的过程,可视其为一“矢量”。

当然,应当看到不同学科领域对精细程度的需求是很不一致的,如航天、量子通讯、空间实验室对接、空间实验站物资补给、深海下潜与载人深潜不仅要精细而且必须精准;最精细脑链接脑图谱,医学中的眼科与心血管手术,军事目标攻击亦必须精确等等。地球科学研究,特别是认识则必须向高精度“挺进”,以使定性科学、推断科学、或然科学、解不唯一性科学等在不断提升精度的过程中逐向半量化与量化逼近。这些均要求必须夯实基础研究,聚焦科学前沿逐步向高精度迈进,乃是创新和自主创新的灵魂。

面临世界科技大潮,地球科学向何处去,则是人们必须思考的问题。因为地球科学必须突破传统以点带线扩展成面的假设、遐想与推断,即须不断提升精度来达到对问题的逼近理解(滕吉文等, 2012a, c, 2016a, b, c; 滕吉文和张洪双, 2012b; 滕吉文, 2007a, b, c, 2008, 2009a, b, 2010a, b)。

地球物理学是地球科学发展与量化的中坚,它从诞生至今其核心是以物理学为基石,以数学、信息科学为手段,并与相关科学门类相结合的一门学科交叉的边缘科学,在本质上是一门应用物理学。它必须以高精度的观测、高分辨率的数据采集和物质属性与空间状态的精细刻画为“链条”,因为它承载着地球内部,即深部物质重新分异、调整,物质与能量交换的轨迹(滕吉文, 2003a, b, 2006a, b, c, 2007a, b, c, 2008; 滕吉文等, 2008a, b)。对固体地球物理学来说,它必须精细厘定地球内部物质运动的行为

与样式、动力学响应和力源机制。正如德国著名地质学家阿尔冈所言,“地质学的未来是地球物理学”。这便表明,这是高精度的地球物理学与地球动力学乃是时代的需求与发展的必然(滕吉文等, 2004a; 2006, 2008a, b, 2016a, b; 滕吉文, 2004b)。

为此,地球物理学必须向高精度不断提升,以达越过地平线去触摸地球内部物质运动的动态脉搏,逐使人们深化对地球本体的认识,并构架起安全、稳定的且可保证长期供给的资源与能源及防范突发事件发生,发展的战略后备基地与监测系统,为人类营造一个良好的生活与生存空间、并实现可持续发展!

当今“上天、下海、入地”乃人类向宇宙挑战的三大壮举(张文佑, 20世纪80年代前后提出),强化第二深度空间金属矿产资源(500~2000 m)、油、气能源(2500~10000 m)的探查、开发和利用乃是构筑我国快速工业化和经济腾飞的命脉(滕吉文等, 2006, 2010),因为在这个世界上若没有大量资源和能源的消耗则不可能创造今天的文明,也无法实现建设世界科技强国的宏图。

1 当今科学发展的势态与地球科学研究的现状有待突破

科学、技术的发展必须向量化“挺进”,这是时代前进步伐的需求,也是一门科学走向成熟的标志。正如马克思所说“一门科学只有在成功地运用数学时,才能达到真正完善的地步”。

1.1 当今科学发展的势态

进入21世纪上叶以来,在世界科学发展的征程上越来越要求量化和高精度。这就要求必须未来不断地创新,方能抢占学科领域的制高点。

(1)科学的高精度升华已成为世界科技发展的必然轨迹

我国在火箭发射、载人飞船、量子通讯、空间实验室诸多方向取得了非凡的成就,天宫二号的成功发射与神舟一号的空间对接,且在轨开发一定规模的空间科学实验及应用。它蕴含了微重力基础物理、微重力流体物理、空间材料科学、空间生命科学、空间天文测量、空间环境监测、对地观测、地球科学研究以及新技术实验等八大领域。这次空间实验室搭

载的空间冷原子钟,采用激光冷却铷原子并与微波相互作用,有望实现 3000 万年时间内仅有一秒钟误差的精度,可使飞行器自主守时的精度提高两个量级。显然,量子通讯卫星的成功发射乃导引我国进入空间科学强国之径,这便标志着我国载人航天进入空间应用发展的新阶段!空间实验室的创建孕育着航天事业的重大突破,又如电子态全新电子器件的研发,将会有颠覆性的创造,它预示着手机今后无需充电了。

(2)精度的提升是创新的硕果

当今我国正处在科技迅猛发展的新时期,在各个科学领域创造了一系列的非凡成果,下面仅举一、二个精度不断提高的实例。

华中科技大学最精细脑链接图谱数据居于世界领先地位,这项研究可分辨出人类脑部的每一个生命源、每一个毛细管,它对人的脑功能、智力发展均有着极为重大的作用。当今的科学界正在由或然向精细化迈进,特别是与人的生活和生存关切的对人眼、脑、心、肺等器官的诊断与手术正在一日千里的前进。

蔚蓝色的海洋是生命的起源和繁盛的摇篮,也是人类繁衍生息的家园,海洋生物、海洋资源与能源、海洋与大气、海洋与军事和国防等等关系着资源、财富和国家领土完整。我国深海下潜技术的迅猛发展,为我国向深海、公海“挺进”所需要的精细下潜,提出令人瞩目的海底蓝图。

这一系列的学科进展和成就乃精度不断提高的产物,是科技创新的硕果。

1.2 在向高精度迈进中的地球科学研究现状

就地球科学整体而言,距“精准”尚有一段相当漫长的路要走,距高精度与不断量化亦尚有一段相当长的距离,即因为整个地球科学远远未能达到半量化或者量化。

(1)地质学。地质学具有古老的传统和历史、且分支学科众多,是一门包络甚广的学科。它是依据地表的派生现象的调查及局域的认识,进行想象与逻辑推断以描述为主体的一门定性科学。在年代测量上误差可为几个 Ma 到几十个 Ma 乃至更大,是相当宏观尺度上的推定。例如所言第四纪以来的活动,即是指 1.8 Ma 以来的构造运动,故难以表征强烈地震的近期活动与预测。在对地层时代理解上,乃是依据不充分的、或不够充分的边界条件来判定或估定。当今整体上是通过锆石测年,或与世界各地地层的层序与时代的对比给予分析与判识。为此,在地

质构造学界有八大学派,如多回旋、地洼、镶嵌、重力、断块、板块等,且各成体系,而其论点与论据亦各异、理念亦当必不同。

(2)地球物理学。地球物理学的分支亦很多,乃是以多元物理场为基石的一门新兴的边缘科学,自 20 世纪上、中叶才蓬勃发展起来。它是以物理学为基础,以数学、信息科学和当代高新技术为依托深化认识地球本体。为此,它必须进行高精度的观测(包括地表、空间、海洋和井中),采集海量的高分辨率数据,刻画地球深部介质的物理属性和精细结构。由于它是在强干扰背景下去拾取微弱的目标信息,故必然地注入或叠加了某种程度的干涉。同时,各分支学科的分辨率不同,不可等量权重,故其解亦难趋唯一。这就必须在基于所得数据的前提下,进行多元地球物理场的综合研究以取得共识的响应逼近。

产生这种响应的原因是,上述观测与采集的数据中包含了一定的误差,如壳、幔结构研究的地震层析成像中,所拾取的震相有十分可靠的信息、较可靠的信息、不太可靠的信息乃至错误的少量信息,在成像后的图像中便包含了以上有关错误信息,并导致图像中的非完全真实图像,可又难于从已取得的图像中剔除。又如在石油地震勘探和壳、幔结构研究中的反射地震,由于得不到精确的速度值,往往是取其速度谱的均值,这当必影响归位并可能导致成像中的必然干扰与误差。在成像后的不确定性中还包括一系列的更难以剔除的本征要素,如观测仪器分辨率不够造成的模糊映像和假象;初始条件、边界条件的不确定性,加载在难以提取的初始模型上;在天然地震观测中不仅地震波的射线路径漫长、穿越多相介质与构造,而是只知接收函数却不知源函数,只利用了上行波(高速到低速介质)而未能应用下行波,以及同一份数据不同人去做、提取频散或用不同方法去反演多会得出差异较大的结果;复杂多波波场(除 P 波、S 波和转换波外,还有绕(衍)射波、侧面波、各种多次波等)难以“干净”分离;反演方法和不同地球物理场所获物理量的不匹配和人为干预参与了模型构建等。

有不少地球物理学家在理解和解释地球物理反演结果时,往往先验地、且严重地受控于地表地质与构造现象、结果及假设推断的“限定”,而不是从地球物理场的精细反演中,在不依赖于浅表层响应和先验性模型的情况下给出地球物理解释,这不仅会误导地球物理学家本身,同时亦会让地质学家给予错误的理解。当今有人说,地球物理研究花钱多、周期

长、见效慢、没有用,与地质学中设想的模型不符;也有人,胜也物探,败也物探(原石油工业部长汪涛);也有人说多做物探,少打“眼”(中石油)等等.在某些领域,在采用国外提出的一些模型正演时还好,可反演时往往差之千里.这表明国人对这一系列引进模型的理念、方法、技术和边界条件尚缺乏透彻的理解和质疑,更缺乏理性的批判和自主创新理念的体现.这便雄辩地表明,地球物理观测与所求得的结果精度尚不高,显然当必限定了对介质物理属性和空间结构的量化厘定.

2 高精度地球物理学是厘定量化认识的根基

当今地球物理学(其中当必包括地球动力学)承载着强化第二深度空间矿产资源和能源的探查和开发;强烈地震孕育、发生和发展的深部介质物理属性和结构及构造环境的认知;厘定成山、成盆、成矿、成岩、成灾、成核和深化认识地球本体;理解在力系作用下深部物质重新分异、调整和物质与能量的交换的研究与探索,因此必须要求地球物理学具有高精度的逼近解答.可这的确并非是一易事,而是必须在理念上、方法上、技术上高度融合和创新的进程,方可逐步得到升华.

2.1 地球物理学应具有高精度的观测、高分辨率的数据采集和精细结构的正确刻画

高精度地球物理学必须满足高灵敏度、抗干扰性强,且稳定性良好的仪器精细观测,剔除随机干扰的高分辨率信息的数据采集,高精度样本物性数据测量和正确反演方法的计算与成像,以取得精细、且解答基本趋于唯一的介质属性和结构展布.

(1) 创新理念. 在地球物理学的发展与进程中,不仅要深化本学科的研究和探索,而且要多元吸取相邻学科的高新科技成就,以构成新的理念和范式.这就必须在吸收和理性质疑的框架下凝练出创新性的科学问题,提出科学的、具超前思维的论点和论据,以形成引导本学科不断前进、并抢占制高点的崭新理念或定则.

(2) 仪器与设备的自主研发. 高精度地球物理学的奋进当必催生新型高精度地球物理观测仪器,实验设备的自主研发(滕吉文, 2005, 2006d, 2009b, 2010b),高精度地球物理学的基础是能否获得海量的精确地球物理实地观测数据. 物理参量的精确化或新物理量的提出与发现乃地球物理学能否达到高

精度的核心所在. 这是因为地球物理学在本质上是一门观测的科学,必须采集巨量的数据并进行相应的处理以提取介质结构与属性信息,因而可靠信息与信息量的缺乏和不足则是任何数学技巧和图像显示所无法弥补的(滕吉文, 2003a, b, 2004b; 滕吉文等, 2004a).

这里应当特别指出的是,正如孔夫子所言:“工欲善其事,必先利其器”(论语). 法拉第的导师戴维(Humphry Davy)亦指出,“最好的科研成果无不取决于好的仪器发展”. 这也与两军作战一样,一个好的司令官在战前必须“车马未动,粮草先行”.

所以说,一种新理念指导下的观测与探测仪器及设备的雏形,一个新物理量的提出和应用、一个参数精度的提高,不仅会大为促进这一学科的发展,而且往往还可能驱动开辟一个新的科学领域(滕吉文, 2006a, b, c, 2009a; 滕吉文等, 2016a, b, c).

为了适应地球内部第二深度空间的油、气、煤能源和金属矿产资源的勘查、开发和利用,提出精细可靠的壳幔结构等则必须突破原有框架,自主研发出大深度、高精度、稳定性强、抗干扰能力强、高灵敏度和高分辨率与大动态范围、智能化的新型地球物理仪器和设备.

(3) 高精度的数据采集需要科学的观测系统设计

高精度的观测系统与高分辨率的数据采集密切相关,因为对其设计与实施是能否取得高质量数据的关键所在. 以地震勘探和地球内部探测为例,观测系统设计应为相遇、多重相遇、追逐、多重追逐的组合阵列,以达能在互换点上提取速度、深度、时间、射线路径、频率和能量的互换与相叠置,即达到地震波传播的运动学和动力学特征的复合验证. 为此,只有严格地遵循这一路线图方可谓高精度的观测,高分辨率的数据采集和反演成像. 显然,若爆炸点距大于或远大于震相的追踪长度,那么不管你用任何方法去反演都不可能取得可靠的精确认识,也不可能获得高精度的介质物理属性和对空间结构的精细刻画.

2.2 理论、方法的深化研究和探索是迈向高精度地球物理学的必由之路

强化学科交叉和创新在科学研究发展进程中十分关键,扎实的基础研究乃是建立正确理论、构筑新的科学方法的核心,严格、可靠的数据采样处理是地球物理学向高精度迈进的必由之路(滕吉文等, 2012a, c; 滕吉文和张洪双, 2012b).

(1) 地球介质属性的必然性. 地球物理学研究的对象是地球内部各圈层的介质属性和空间结构与其

深层过程,它们多为非均匀的、各向异性的和非完全弹性体。在至今的不少部门仍然多将介质视为完全弹性、无限均匀的和各向同性的且从声波方程出发,这对地球介质与结构来讲是极大的“简化”与近似。因此,在这种前提下所依赖的边界条件和提取的初始模型就不可能是多元要素约束下的逼近模型。

(2)对地震震相或波列的科学定则,必须严格地从地球物理学的原理和定义出发,这是理性深化的基石和不可逾越的界定。

在人工源地震宽角反射/折射探测中,有一些部门将由此而呈现在记录中的一系列震相统称为“折射波”,并在口头报告、论著、项目或课题报告、总结中乃至评审意见中不断出现。在宽角反射的诸震相中有 $P_g, P_1, P_2, P_3, \dots, P_m, P_n$, 这里 P_g 为来自结晶基底的折射波或弱回折波, $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$ 全为反射波,只有 P_n 为来自壳、幔边界的折射波或回折波。显然将其称为“折射波”当然是不符合物理定则的,精准的定名应为“反射/折射”为宜。

(3)地球物理学中有关地震方法的定义必须精确,译名必须有物理内涵

近几年来有不少地球物理学者在他们的论文、科研报告、项目申请书、报奖材料中常见有“主动源地震”和“被动源地震”之称,似乎在我国已获得“共识”,究其来源乃为在个别外国人的文章中提及“Active”和“Passive”地震之称。不管中国人也好外国人也好,将人工源地震勘探和深部壳、幔速度结构探测称为主动源地震,即其意为可按科学目标设计激发源点和接收点。把天然地震称其为被动源地震,即是想突出它不受人为控制的波场。显然这是不够全面和不尽准确的,这样的定义或翻译都是欠妥的。

第一,名称的科学内涵,将“Active 地震”翻译为主动源地震,将“Passive 地震”翻译为被动源地震抛弃了地球物理界对其的科学定名,认为其新颖性是欠妥的。因为它们不具备明确的物理意义和业内外人们共识易懂的科学内涵。持主动源地震者主指,研究者为达到设定目标所设计的爆炸点距、点位和观测系统以进行所激发地震波场的有序观测,而将天然地震激发的地震波场称为“被动源地震”,即为人们所无法控制的地震波场响应。

第二,要严格内涵并准确定义,应当指出的是,在人工源地震中,不仅包含为了某一科学目而设计的爆炸点位、点距所控制下的观测系统,而且还包括核爆炸、大型工业爆炸等,而后者则不是地球物理工作者所能设定的爆炸点与爆炸点间距、点位和观测

系统,以及何时爆炸激发地震波场而是人们必须受制于它,不属所谓的“被动源”。又如弹药库爆炸,由于负荷过载而导致厂房、坝基、水库崩塌、山体滑坡等激发的地震波场等均不是地震活动与危险区产生的地震,而完全是由于施工欠佳、老化、过载导致的,故不应属于“天然源地震”范畴。所以说“主动源地震”和“被动源地震”缺乏明确的物理内涵,更未能包括上述各种事件,故在科学上是不严格的。

第三,还是称为“人工源地震”和“天然源地震”为佳。不要再让那些模糊的概念和不具有科学意义的各类词汇传播而污染地球物理的科学含义。在翻译和利用外文名词或术语时不要仅靠字面而直译,而必须赋以科学的体量。这也就是说科学名词和词汇的表示不能违背科学内涵,更不能形态意识化。例如, Nature Green 直译为天然绿色或自然绿色,可是当你真正读懂它的科学内涵后,则将其译为“原生态”,这是多么科学与艺术,即富有生命力。又如,美国有一影片《Waterloo Bridge》,直译乃“滑铁卢桥”,而我国电影界在融会贯通地理解了该影片的艺术情节和故事主题后,将其译为“魂断蓝桥”,这是多么令人兴奋、且具魅力的翻译啊!又如“Moring News”直译可谓“早间新闻”,可中央台将其译为“朝闻天下”,多么宏伟、开放!

(4)不同体系的科学术语不可混用

在有些人的文章、报告中常见地壳、岩石层、软流圈或地壳、岩石圈、软流层。看上去似乎没有什么毛病,但实则不可这样用。因为你若称岩石层,则对上地幔顶部的低速介质只能称其为软流层;反之,若将其称为岩石圈,则上地幔顶部的低速介质就只能称为软流圈。又如造山带、克拉通与地台、地槽之间不可混用等。

(5)对创新的正确理解

近年来一系列的计划和规划中常见有很多创新和自主创新,也有很多首创和领跑世界等等提法。这充分表明人们对创新的理念尚未能很好地理解,似乎让人感觉到所做的任何工作都是创新,都是该学科范畴的世界领跑者。例如有人说,我们做了多少万千米的地球物理剖面,美国才几万千米,而美、英、俄、意合起来到某年也不如我国做得多,为此我国就是领跑世界!我想这个问题可以讨论!因为创新、领跑是指在学术上的首创,论点与论据的原始发现与提出并被共识。应当清晰地认识到:

经费巨额投入+十大体量的工作量=成果或大成果
但≠创新

更≠自主创新

经费巨额投入十大体量的工作量=成果或大成果

但≠世界领跑者

更≠世界领先

创新、自主创新、世界领先、世界领跑者在科学发展的长河中是具有特殊与深远意义的。概括起来,它们主要是指新颖的思维、独特的超前思维,且确具前瞻性和导向性;前所未有的创造、发明,且其科学真谛具有学术价值和广泛的应用潜力与前景,其论点与论据组构了某科学领域发展的轨迹,且具成效与被共识。所以说,创新、自主创新、世界领先、世界领跑者绝不是前人同类研究的N次重复、边角补充或填充了某地域性的数据,更不是工作体量的多少,而是创造性思维促进、引领了某科学领域核心科学问题的发现、生长和再造。

(6)如何正确理解科研经费投入与创新

上一段主要阐明了对创新的正确理解,那么必定会有人问,按你这样说创新、自主创新、世界领跑者、世界领先就不需要科研经费投入和进行大体量的科研工作了?这是一种极端的说法或误解,亦即“抬杠”。因为任何科研工作的开展、进程、创造无一不需要经费,经费少了亦难办事,而确不是很少的经费所可及。问题是在进行某项科学研究时,该项研究的核心科学问题是什么,内涵是什么,切入点在哪里,途径又是什么?创新、自主创新可能隐含在大量的工作或数据之中,但绝对不是以工作体量为准绳,而是新的科学思想和超前思维。

3 如何才能使地球物理学研究的精度加速提升呢?

这是一个十分复杂的科学问题,也是一个涉及面甚广的系统工程。因为它关系到本学科与相邻学科的发展、学科交叉、当代高新科技成果的融入,关系到该学科领域的人才匹配,如将才、帅才和“领军人物”的涌现,特别是该学科领域专门人才的智慧、力量和对他们的信任与重视。

3.1 首先必须厘定地球物理学在地球科学发展中的使命

中国科学院地球物理所第一任所长赵九章院士曾将科学与艺术相并提,并借用了白居易《长恨歌》中的两句词“上穷碧落下黄泉,两处茫茫皆不见”来定义地球物理学。这表明,地球物理学是研究地下不为人肉眼所能看见的物质与事件及其运动的行为与

轨迹,其所研究的内容均为未知的,且必须越过地平线去“抚摸”地球内部物质运动的状态与动态“脉搏”。

(1)地表现象乃是地下深部物质与能量交换并传至地表的派生现象。这就是说对地表派生现象的分析、研究可以对地下深处物质重新分异、调整,物质与能量交换以及所发生事件的深层过程与动力响应给予推断,但却不能证实其为必然的因果关系。为此,以地表地质模型为准则,去分析和解译地球物理异常场、图像及其边界场效应是不可全识的。如果这样,则当必会导致不完全正确或不正确的解译。

(2)地球物理学家必须首先把握地球物理学在地球科学发展中要理解和厘定的科学问题,因为地球物理学所研究的对象是看不见的,而是必须通过在地表进行观测和探测、采集海量的数据,进而通过数据处理和反演来认知地下深处物质的物理属性和空间异常结构及形态。这样就必须以实际观测和探测的数据为基础,并基于反演求得介质物理属性和空间异常结构给出地球物理的理解,建立地球物理运动学和动力学的模型,厘定地球物理科学问题的核心所在,理解科学问题及其论点和论据。

在这样的基点上再去结合地质与构造(包括地球化学),并在集成与综合的基点上给出逼近的认识与解答以构筑共识的模型,而绝不是利用高精度观测、探测采集的高分辨率数据和地球物理精细结构的刻画及模型量化去符合仅依地表派生现象推断与设定的结论。如果地球物理人就要这样做,并去讲同样的地质“故事”,那么在地球科学领域里也就不需要地球物理学了,高精度的地球物理学也就永远消失了!

为了整个地球科学的半量化与量化,高精度的地球物理学必须逐步快速实现。这便要求:①高灵敏度、大深度、大动态、且稳定性状态佳的,特别是智能化的新型地球物理仪器的自主研发;②密集观测与探测、高分辨率数据采集和可靠信息数据体的形成;③提出与创建新的反演方法和解译系统,驱使反演结果更为逼近于真实;④反演、建模、解译不同物理量的集成与综合分析;⑤理论扎实和经验丰富的观测者、数据采集者,理论与方法的研究者、反演结果与地球物理内涵识别者和它们的集成,对其深层动力过程的正确理解者,才能获得逼近的正确解答。

3.2 地球物理学中各分支学科的互检是取得正确理解不可缺少的环节

地球物理学的研究是在强干扰背景下提取微弱

的有用信息. 为此, 在当剔除干扰和多元影响基点上, 建立高分辨率有效信息的数据库是十分重要的.

(1) 准确认识不同岩石、矿物的物理属性和反演模型的建立, 对于地球内部而言, 介质物理属性和结构具有强烈的地域性. 所以在构筑反演初始模型时必须给出科学与合理的边界条件, 而不是他人已有模型和参数的再版; 在数学模拟中则必须在多要素约束下方可起到应有的效应

(2) 对一个现象或某一异常的认知及确定, 要通过多元的正、反演计算, 迭代与复合以给出逼近的认识, 所以给出高精度的物理参量十分重要. 例如, 在石油地震勘探中, 若给不出精细的速度谱, 则在归位时就会遇到困难, 而在成像后则包含了一定的错误, 而且难以从已得图像中剔除. 为此, 高精度的叠加速度和偏移速度乃是取决于能否给出一张精细叠加或偏移地震记录图的关键所在, 而不是给出几个速度值或成像后地震双程走时图的“相面”来确定.

(3) 在所述基础上还应进行数学和物理模拟检验. 在一个断裂纵横、岩相多元、构造极为复杂地区记录的一张双程地震图上, 它包括了反射波、折射波、绕(衍)射波、侧面波、转换波、多次波等等, 且有的震相极为模糊(特别是壳、幔结构研究中只见不连续的“影子”). 在这种情况下若不进行剔噪和严格校正, 若依模糊“影子”加地表地质构造而主观地画“彩色”线条, 在结果中却给出深大断裂、裂谷、俯冲、断离、岩浆房、地幔柱……, 当必会包含了极大的不确定性、乃至错误, 这是非常危险的. 人们又不能到处用高昂经费去打深钻井和超深钻井来证实, 所以要求地球物理学各分支学科的精度提升是十分重要的, 是促进该学科发展、对地球科学中问题的理解与不断提高其认识度, 即向半量化和量化逼近的关键所在.

3.3 地球物理学中各观测方法与精度

当今, 在地球物理学方法中, 高精度亦用的很滥, 如高精度密度结构、高精度磁场观测、高精度电性结构、高精度层析成像、高精度速度结构、最高精度的地震反射等等. 有时还听到与见到什么: 精准地质构造、精准地球物理或精准地震反射等, 应当说这是我们地球科学界必须努力奋斗的方向, 但当今尚远不及精准, 因为人们必须清晰地理解何谓高精度, 又何谓精准? 在论及高精度时, 当必有哪些约束? 显然天然源地震波场、电磁感应波场等很难说是高精度和精确, 前者不知源函数只知接收函数, 并只用了台站下方向上的上行波, 而未能利用下行波等, 且其时间采样间隔是以数十毫秒; 后者解的不唯一性

极强, 亦难以给出两位数的电阻率和边界、特别是下边界. 这里尚未涉及到观测台站的间距和观测环境及干扰程度, 故目前尚说不上是高精度, 因为并非凡地球物理观测与反演结果都可以冠以“高精度”或“精准”.

(1) 精度要求的观测框架

在一般情况下, 若人工源地震反射/折射深部探测接收点间距大于 3 km, 爆炸点间距大于 100 km, 缺乏完整观测系统; 重力场(特别在地形复杂地区), 磁力场观测点间距大于 2 km; 大地电磁测深观测点间距大于 5 km; 天然地震宽频带仪器观测台站间距大于 10~15 km; 地震反射若无测井或 VSP 资料, 无可靠速度数据, 亦未严格进行静校正等, 则均不属高精度范畴, 即均不应冠以高精度、更并非精准.

(2) 高精度地震反射深部探测

近垂直地震反射波场记录清晰、能量足够强, 可清晰识别震相, 双程记录图上所呈现的波类型(P 波、Ps 波、绕射波、侧面波、多次波、多元波)得到分离与识别, 剔除了噪声和干扰背景. 通过波动方程进行了严格、连续的静校正, 双程记录图上显见清晰的反射界面段和明确、可靠分层(不是模糊的迹象或似是而非的依靠人为画线条, 而必须是清晰共识的映像), 且双程走时图上呈现多处向上突出的多元弧形叠置已不复存在. 在归位、成像过程中具有精细的速度谱和偏移及叠加速度值, 最好能有深井 VSP 观测匹配.

(3) 高精度地震反射/折射深部探测

全波形地震记录清晰、能量强, 清晰识别震相及波列. 加强相遇和多重相遇、追逐和多重追逐观测系统约束下, 各震相波场在运动学和动力学上均可有效互换性. 各震相追踪长度应大于两爆炸点间距离, 在复杂地表地区必须严格进行连续的近地表上覆低速层和高度校正, 并求取多层介质的高精度层速度、界面速度和平均速度, 反演刻画介质精细速度变异和层、块结构. 确定壳、幔介质中异常体(不同产状断层、破碎带、低速区、高速区和起伏变化), 特别是低速层(体)的发现与厘定、延伸与尖灭, 要有必需的物性数据. 多波利用与波场分离及震相识别具有极为重要的作用, 在整体介质属性和结构厘定中, 时间采样间隔要达到 10~15 ms, 速度误差应小于 $0.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 界面深度与起伏误差应小于或等于 1~2 km.

(4) 高精度重力场观测

在重力场观测地区(带)应首先从国家测绘局或总参测绘局取得标准的重力基点数据, 在野外通过

快速链接建立起具有一定密度的重力基点网. 重力仪必须经室内和野外调适、检查(特别是漂移、掉格),在正常状态下进行观测,同时要高精度 GPS 定点测量(五颗卫星以上). 野外采集的数据必须进行多项完整的校正,特别是精细的地形改正(包括近区与远区),获取布格异常数据库,在反演所得密度结构中密度误差应小于或等于 $0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,各层界面起伏与深度误差不应大于 2 km,测点距应小于或等于 1 km. 重力场能较经济地提出区域重力异常分布和变化,这是地震波场所不能及的.

(5) 高精度大地电磁测深观测

中长周期观测点距应小于或等于 5 km,观测时间应为 2 日/点,长周期与超长周期观测点距应小于或等于 10 km,观测时间应大于或等于 5 日/点,二维电阻率分布图上应呈现出清晰的高阻、低阻与过渡区及界带的电阻率值. 要具有一定量岩石样本的电性测量数据,电阻率误差应小于或等于 $10 \text{ } \Omega\text{m}$,电性结构区(带)范围差异不应大于或等于异常区(带)的 10%,解的非唯一性应降低到最低(但仍会存在). 对 Moho 界面起伏与深度厘定的边界的误差应小于或等于 5 km,上地幔和软流圈的深度及起伏误差应小于或等于 10 km.

(6) 高精度磁场观测

首先与周边地域固定地磁台站密切结合,在区域磁场背景下设立流动磁日变站. 经调试、检验正常后的仪器进行观测,同时收集和采集岩石样本测量磁化强度(磁化率),以取得观测区不同地区的岩石磁性数据. 在观测过程中同步进行高精度 GPS 测量(五颗以上卫星),在野外采集的数据必须经严格的各项校正. 在反演过程中要求每一测点误差应小于 0.2 nT ,对结晶基底埋深和起伏深度误差不应大于或等于 2 km,测点间距应小于或等于 1 km.

(7) 高精度天然地震观测

在天然地震(远震和近震)观测中要记录到来自各方向的、震级各异的地震体波和面波,在观测前期,踏勘、观测点位选定比其他方法重要. 因为每一天然地震台站均需建立临时台基或“台房”,仪器要安置在深约 1~2 m 的基岩面上(严格防潮、防水)且干扰背景最小,电源方便及人员活动少的偏僻地方. 台站一一安置后需进行调试记录,以保证仪器的正常运行. 每隔 1~2 个月要进行台站工作与记录的检查. 为保证连续地记录到所需地震事件,台站位置可视记录情况进行调整,台站间的间隔为 5~10 km,每一期观测需要 1.5~2 年(视地震事件情况)的数

据采集时间反演成像速度结构的速度误差,对壳-幔边界(Moho)应小于或等于 $0.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,分层界面埋深误差不应大于或等于 5 km,对上地幔软流圈、410 km 和 670 km 间断面速度误差应小于或等于 $0.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,深度误差不应大于或等于 10 km.

3.4 如何厘定高精度的地球物理观测与探测结果

应当充分理解的是,高精度地球物理观测是具有约束条件的,而不仅仅是加密了观测点就是“高精度”,当然它是非常重要的因素. 因为精度还必然是受到方法本身本征特征的制约,数据采集的精度以及反演方法的限定. 上述 3.3 节所论乃仅指不同地球物理方法本身在观测时的高精度,却不等于其所得结果均为高精度.

(1) 人工源地震反射、宽角反射/折射的观测和反演结果相对于其他地球物理方法而言,可称其为高精度. 在人工源深部地震探测中,地震反射与宽角反射/折射各具优缺点,但却又各具特色.

① 近垂直反射波法

a. 不足之处,难以进行波列识别与对比,不能求得精细速度值,速度谱会有较大偏差,故影响归位和成像,特别是在复杂起伏地表和深部结构错综的条件下,静校正难以准确,图像中包含了一定量且不易剔除的干扰或错误,亦难以发现低速层. 对下地壳,壳幔边界厘定的分辨率尚应推敲!

b. 优越之处,由于观测点距小(10~20 m)、激发次数多,所得波场清晰,可给出断续的界面展布与异常构造事件.

② 宽角反射/折射波法

a. 不足之处,观测点距相对近垂直反射要大 5~10 倍,由于地壳内部和上地幔顶部均为宽角反射,另还有基底弱回折波和壳、幔边界折射波,动态范围偏于低频,故对岩相和浅层小幅度断裂的分辨率不及油气勘探中近垂直反射波法. 这在石油地震勘探中最为凸显.

b. 优越之处,由于可进行波列和波形识别、追踪同相轴,且十分关键的是可以通过多重相遇和多重追逐观测系统,利用其共反射点的波场运动学和动力学特征检验与核定各震相. 计算求得各层介质层速度、界面速度和平均速度、即给出分层的速度结构. 成像后可精细厘定低速层,分辨 P 波、S 波 Ps 波和来自断层棱边的绕(衍)射波及断层面上的侧面波.

(2) 人工源深部地震探测为高精度

① 近垂直反射与宽角反射/折射的互补

基于上述方法对壳、幔精细结构与介质属性两

者各具特色,且各自不可替代,如在复杂壳、幔介质与构造地域,有时较高频的近垂直反射甚至得不到可识别的波场与震相,在深处又受到分辨率的限定而较低频的宽角反射/折射却可获得清晰可靠的记录与波列。如在印度板块与欧亚板块的碰撞-挤压过渡带地区,又如近垂直反射取得的弱反射区(带),宽角反射/折射确可发现走时滞后与地震波能量的减弱和主频的降低。当然,连续几个震相与走时均呈现出一致变化时则可弥补宽角反射/折射的不足。

显然,二者的结合必将会取得更为精细的结果,而其代价则为加大投入。

② 两者共同特点

近垂直反射与宽角反射/折射等方法零时的计时误差为 5~10 ms,观测点距小、深度反演精度高(1 km),特别是宽角反射/折射充分利用了多重相遇和多重追逐完整的观测系统,通过运动学和动力学互换原理准确厘定各震相,且可精细刻画壳、幔介质的各速度分层界面,它们是所有地球物理观测、处理和反演计算中能求得更精细介质属性和结构的最佳方法。地震反射波法和地震宽角反射/折射方法所得结果属高精度。在双程走时图上的所含界面(中、浅层)的不连续细节上,前者优于后者。

(3)其他地球物理观测与探测方法所得结果均不属高精度

① 在天然地震的观测中,不论是地震面波频散、层析成像、接收函数、背景噪声的利用均为利用天然源,而天然源的记录与反演仅知接收函数而不知源函数,且仅利用了由高速介质到低速介质的上行波,即单程走时(人工源地震为利用下行波、亦利用上行波的双程走时),它只能得到每一台站点下方的结构,又缺失完整的观测系统。它难以求得较准确的速度值,时间采样间隔为 0.02~0.05 s,且提取的地震震相中包含可靠、比较可靠的以及不太可靠和少数错误的信息,在反演成像后其不太可靠及错误的信息是难以从图像中剔除的。另外求得的地壳、上地幔结构精度亦较差(5~10 km)、又难确定异常边界。因为天然地震反演对 Moho 界面和岩石圈底界面较敏感,故远不及人工源地震反演求得的沉积建造、结晶基底、上下地壳、地幔盖层及上地幔软流圈中速度分布与结构的精度高。

天然地震研究壳、幔介质属性和结构优于人工源地震的地方在于其较经济。若能同时铺设几百台流动地震仪观测台则可得到某面积区的结构,而人工源地震要取得面积分布的壳、幔结构则要更大的

投入,但确可提升精度。为此,天然地震对结构,可快速大面积地进行地球内部的研究,与人工源地震相比却不属高精度。

若要提升精度,向高精度迈进则需最大限度地加密点距,接收台网要接收来自相互交叉震源,即近似相遇观测系统、追逐震源(即近似追逐观测系统)的信息。提高震相识别(不仅依靠走时,而且要依靠频谱、能量和极性)的能力,创新求取速度方法和反演方法以及多要素约束下的初始模型提取等。同时还要延长观测时间,约观测 2 年以上记录更多的地震事件,并进行事件的严格筛选,才能在某种程度上提升一点精度,依然是较宏观的结果,因为这受限于方法本身的弱点。

显然,那种认为背景噪声所得结果要比天然地震面波频散、层析成像、接收函数,乃至比人工源地震所得结果的精度还要高的理解,不论在理论上、方法本身、反演过程、结构刻画、分析与解释均是难以为人们接受的,但它毕竟是一种研究壳、幔宏观结构的方法,应予以应用和发展。

② 重力观测与反演结果

当今的关键问题是,重力密度反演的初始模型是建立在对各层介质的密度给定(依文献或书籍),或按线性关系与地震波速度的相关性拟定,即并非地壳、上地幔各层介质所采集的样本经温、压条件下的密度测定或逼近的密度值。反演中是依靠人工源地震所得壳、幔介质分层、分区、分块对密度的调整、拟合以趋于与实测布格重力异常曲线的符合,所以它尚达不到人工源地震的高精度。

若要提升精度则需建立带有地表起伏的密度结构反演方程,在地面与井中采集足够数量的样本进行实验室温、压条件下的密度测量,并将其结果数据用于重力密度反演。同时,要加密点距,且对每一个重力观测点均需严格建立在 6~10 m² 范围内的平整观测平台,以达在一定程度上避免边界响应,以提升结果的精度。

③ 地磁观测与反演结果。地磁场观测对磁性环境要求较高,因为铁磁效应到处存在。日变校正不可能对每一测量点的环境均给予全方位校正。由于十分缺失结晶基底以上整个沉积建造岩石的磁化率数据,而反演中是利用通用值或类似岩石与矿物的邻区参数,反演结果中包含了固有的差异,故难以取得高精度的结果。

若要提升精度,需通过一定数量样本采集与实验室测定,给出较充分的磁化率数据,并进行磁性结

构反演. 在观测中仅靠原点观测是不够的, 需在一个小面积, 即 $20\sim 30\text{ m}^2$ 范围内进行十字交叉观测, 以其均值作为该点的磁异常 nT 值, 同时要创新与量化地磁反演方法, 以达在一定程度上提升结果的精度.

④ 大地电磁测深与反演结果

大地电磁测深的电阻率异常受到多元要素的制约, 特别是在人员密集的工矿与作业地域更为严重, 较其他地球物理方法相比其解的不唯一性较强, 它与天然地震一样, 即给不出清晰的岩相和结构划分的明显界线, 往往是一个模糊的过渡带, 特别是深层过程往往与人工源地震反演结果差别较大. 但由于其经济性, 又可通过不同周期的适时观测取得地壳、地幔电性结构的轮廓, 其精度当然不及人工源地震测深, 但它确是研究壳、幔电性结构的好方法.

若要提升其精度, 重要的是如何取得不被干扰的电阻率数据, 延长观测时间取得稳定的数据采集, 同时必须不断改进和创建新量化的反演方法. 同时要有足够岩石的电性样本的电阻率参数测定, 并参与反演以提高成像精度, 最大限度地减少解不唯一性.

由以上讨论可见, 相对而言当今除人工源地震探测可称为高精度外, 其他方法目前尚难以达到目标. 为此, 各方法如重力场、磁力场、电磁波感应场、天然地震波场均需在先验的基础上, 对仪器设备、观测系统、校正方法、反演方法、图像识别、干扰剔除与理论等诸多方面进行有效的改进和创新, 在逐步提升精度的基点上向高精度逼近. 这是地球物理学, 亦是整个地球科学不断精细、并逐向精准迈进的基本轨迹.

(4) 多元集成与综合逼近

这是各种精度地球物理观测、探测、数据采集、精细结构刻画基点上的一项综合分析与研究的过程.

①重、磁、电、热地球物理边界场响应的继承与逼近;

②密度、电性、波场速度结构的集成与逼近;

③运动学和动力学标志的厘定和建模;

④在多元集成和逼近基础上厘定对所研究科学问题的认知和新概念的提出.

3.5 厘定在多要素约束下的数学-物理模拟

在高精度地球物理探测与观测研究进程中, 正演和反演均具有重要作用, 而如何建立起多要素约束下的数学-物理模拟的边界条件和提取初始模型

乃十分关键.

(1) 简化与理想的数学-物理模拟. 在进行数学或物理模拟中往往要简化模型, 给定物理参数和边界, 因为它有益于和易于数学运算和物理模型材料的选择及建造. 这样的结果当具有概念性、泛性与宏观理解, 对一些问题的概念认识是有益的, 但难以对实际科学事件给予科学的逼近解答.

(2) 多要素约束下的数学-物理模拟. 如何在多要素约束下给出合理的边界条件, 即必要条件和充分条件(包括几何与运动学和动力学相似的条件), 提取合理的、有针对性的初始模型十分关键. 因为计算或模拟结果对实践中所获数据的反演结果的解译匹配、深化理解和指导有着不可或缺的效能.

显然, 高精度地球物理学必须从理念和定义出发, 基于实际观测或探测、数据采集与处理、反演计算、厘定物理属性与精细结构刻画和多要素约束下地数学-物理模拟程序, 它们之间的耦合乃是促进地球物理学发展和不断提升精度的必须!

4 科学的选择和利用人才是地球物理学向高精度前进的核心

这是一个极为普遍的理解和认知, 没有高端的科技人才任何好的设想均难以实现. 为此, 选拔人才和人才的高智、科学与合理利用乃是驱使地球物理学不断向精细化逼近的内核.

4.1 地球深部资源、能源、灾害和深化认识地球本体是地球物理学的本能与天职

在地表所见各类现象, 如成岩、成山、成盆、成矿、成灾, 乃深部物质在力系作用下重新分异、调整与运移, 即深部物质与能量强烈交换的产物, 故仅依地表派生现象的假设或推断及定性描述是不能理解或不能较完善地理解其缘由的. 钻井深度是有限的, 仅触及地球的“皮毛”. 为此, 只有地球物理学通过一系列高精度观测与反演才能越过地平线, 去“抚摸”地球内部物质的动态“脉搏”. 这是因为(滕吉文, 2003a, b, 2004b; 滕吉文等, 2004a; 滕吉文等, 2009a, b, 2016a, b, c):

(1) 地球内部物质与能量的交换. 这种深层过程和动力学响应不是在地球内部处处皆存, 而是在力系作用下由于介质结构和构造的不均匀性、各向异性及变化的非线性性而导致仅在局部的特异的地带孕育、发生和发展. 为此, 必须研究资源、能源、灾害孕育、发生和发展的深部介质属性、构造环境及其深

层动力过程,它是一个物理-化学过程。

(2)力系作用.实际上通常人们所讲的动力学乃是力系作用的一种响应,而必须深入到核-幔边界,即研究与探索其物质组构和力源作用体系(滕吉文等, 2016a,b,c)。

4.2 在地球深部研究中地球物理学家应起到中坚作用

当今,“上天、下海、入地”乃是人类向宇宙挑战的三大壮举(张文佑, 80 年代前后提出),第二深度空间金属矿产资源(500~2000 m)和油、气能源(>5000~10000 m)(滕吉文, 2006a,b,c, 2007a,b)的创见均已写入国家深地规划的各种计划与申请,目标及技术路线之中!实际上人们尚未能较准确地理解第二深度空间的内涵与定义,因为第二深度空间的金属矿产资源命题的核心是,要求地球物理的探测深度上达到 5 km,在 3 km 深度范围内要求所得信息达到高分辨率,以保证在第二深度空间(500~2000 m)探查与发现大型、超大型矿床和多金属矿集区和油气区.也有人将六、七十年代找矿勘探的一种口号,即无量纲的“攻深找育”(这是基于当时的认识、技术水平,我国的找矿规范为 0~500 m 的基点上提出的“口号”),来回避全新的、量化的且具科学依据的第二深度空间的量化新理念。

当今花巨资,即数百亿人民币来探测和研究壳、幔内部结构与深层动力过程,要向第二深度空间探查金属矿产资源和油、气能源及近地表地下空间应用,这是摆在人们面前的一个极为重要的深部地球物理研究的复杂的巨型系统工程。

依据国家战略需求和创新方针,这是一个亟待破解的难题,为此:

(1)应集我国多年来从事地球物理深部探测与对其属性、结构、资源与能源,强烈地震深层过程且有雄厚积累的真正一二线的地球物理专家的智慧和能力,如中国科学院、中国地震局、自然资源部和各有关大专院、校这一领域的专家与学者。

(2)必须对国家计划的每一个环节进行名副其实的真正论证(讲优点、也讲不足、还应讲改进等)、答辩,制定出科学的规划,确立研究与探索的核心科学内涵及可行目标。

(3)必须组成真正的国家队,集国人广大智慧。

我在有关会议上主要讲述了“上天、下海、入地”的来历,第二深度空间资源与能源新理念的科科学内涵和定义,并对有人和有些部门提及自主创新“国际领先”,“世界领跑者”等提法依据自己的理解给予了

定义和解读。

应当严肃指出的是,纳税人拿出这么多钱用于科技事业的发展,作为科技工作者应当如何面对?不能在国家名誉下以个人或部门为主线,应当是基于这是一个国家战略需求,又为多部门共同申请所获,故而正确的路线应是内行、外行、老、中、青密切结合组成真正的国家队,通过这一国家的巨资投入,建立起高精度的地球物理学,做出真正具创新性的科学贡献!为建设世界地球物理科技强国而奋进!

5 结语

地球物理学发展至今,在整体地球科学发展的进程中越来越显示出其不可或缺或不可替代的科学效应.当今各学科在不断向高精度“挺进”之际,强化学科交叉、夯实基础研究,破解科学难题并奋力创新乃地球物理学发展之必然轨迹.地球物理学必须快速向高精度发展,并驱动地球科学进入到半量化或量化阶段,并逐步给出高精度及逼近彼岸的唯一性解答。

为此,强化第二深度空间金属矿产资源,油、气、煤能源和地震及火山孕育、发生和发展的深部介质和构造环境的研究与探索,构建起安全、稳定且可长期供给的资源与能源战略后备基地,为人类与社会发展中灾害的防范和地下空间利用等做出贡献,此乃当今世界高精度地球物理学未来创新与发展的必然轨迹与使命!

References

- Teng J W. 2003. Introduction to Solid Geophysics (in Chinese). Beijing: Earthquake Press.
- Teng J W. 2003a. Great achievements in geophysics in the 20th century and developing frontiers for the 21st century. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 10(1): 117-140.
- Teng J W. 2003b. Dynamic process of substance and energy exchanges in depths of the Earth and formation of mineral resources. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 27(1): 3-21.
- Teng J W, Zhang Z J, Bai W M, et al. 2004a. Lithospheric Geological (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Teng J W. 2004b. Geophysical Basic Research and Innovative Ideas in the Process of Marching Towards A Scientific Power. Research on Deep Structure and Dynamics of Mainland China (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Teng J W. 2005. The development and guide direction of research

- and manufacture of Geophysical instruments and experimental equipments in China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 20(2): 276-281.
- Teng J W. 2006a. Where are the contemporary Geophysics of China going. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 21(2): 327-339.
- Teng J W. 2006b. The developmental trends of the contemporary Geophysics and the tasks in research process of systemic Geosciences in China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 36(5): 685-716.
- Teng J W. 2006c. Strengthening geophysical exploration and exploitation of metallic minerals in the second deep space of the crustal interior. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 25(7): 768-771.
- Teng J W. 2006d. The development guide direction and locus of research manufacture and industrialization for the geophysical instruments and experimental equipments in China. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 45(3): 209-216.
- Teng J W, Yang H, Zhang X M. 2006. Development direction and task of the geodynamical research in China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 26(11): 3159-3176.
- Teng J W. 2007a. The opportunity, space and challenge for the development of geophysics in China of today. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 29(S1): 1-11.
- Teng J W. 2007b. The developmental opportunity and challenge of Geophysics in the present age in China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(4): 1101-1112.
- Teng J W. 2007c. Development prospect and independent innovation of petroleum geophysical prospecting in China. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 46(3): 213-225.
- Teng J W. 2008. The core scientific problems and development direction for the contemporary Geophysical research. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(3): 637-640.
- Teng J W, Tian Y, Liu C, et al. 2008a. Dual-phase sedimentary basins and old crystalline basement in China and deep oil and gas reservoirs in Northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 38(4): 527-552.
- Teng J W, Zhang X M, Yang H. 2008b. Exploration and exploitation in second deep space of crust interior and high efficient utilization of the major energy-coal resource in China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(4): 972-992.
- Teng J W. 2009a. The research of deep physics of Earth's interior and dynamics in China: The sixteen major thesis evidences and scientific guide. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 24(3): 801-829.
- Teng J W, Bai W M, Zhang Z J, et al. 2009a. Development direction and ponders of the continental dynamics in China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 24(6): 1913-1936.
- Teng J W. 2009b. Specific proposals with regard to set up a "Zhang Heng Project": for research development and industrialization of Geophysical instruments of China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 24(4): 1155-1166.
- Teng J W, Ruan X M, Zhang Y Q, et al. 2009b. Theoretical concept for sedimentary basin, crystalline basement and the origin of oil and gas and its exploration and exploitation in the second deep space. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(11): 2798-2817, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.015.
- Teng J W, Yao J J, Jiang C Z, et al. 2009c. Magmatic rock mass and information for large and superlarge mineral deposits and its ore-prospecting effect in deep crust. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 25(5): 1009-1038.
- Teng J W, Ruan X M, Zhang Y Q. 2010. Geophysical exploration for oil and gas in the second deep space (5000~10000 m) in crust: The only way for the development of fossil energy. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 25(2): 359-375, 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.02.001.
- Teng J W. 2010a. Ponder and research on the genesis and occurrence of strong earthquakes and the prediction of their place, time and intensity. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 53(8): 1749-1766, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.001.
- Teng J W. 2010b. Strengthening exploration of metallic minerals in the second depth space of the crust, accelerating development and industrialization of new geophysical technology and instrumental equipment. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 25(3): 729-748, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.03.001.
- Teng J W. 2011. The exchange of substance and energy, different sphere coupling and deep dynamical process within the Earth. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 8(3): 1-8.
- Teng J W, Pi J L, Yang H, et al. 2012a. The ponder for study the intension and locus of continental dynamics in China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(3): 851-862, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.015.
- Teng J W, Zhang H S. 2012b. The purpose of science and technology development and innovation is to provide real portrait of the universe. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 27(3): 817-826, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.03.001.
- Teng J W, Hu G Z, Yang H, et al. 2012c. Disciplinary intercrossing and interdisciplinary science: inevitable development in innovational course of geophysics. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 27(6): 2263-2278, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.06.001.
- Teng J W, Yang H. 2013. Deep physical and dynamical process for the formation and accumulation of oil and gas resources in the second deep space (5000~10000 m). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(12): 4164-4188, doi: 10.6038/cjg20131220.
- Teng J W, Song P H, Mao H H. 2014. The orientation and problems of contemporary intra-continental physics and dynamics. *Geology in China* (in Chinese), 41(3): 675-697.
- Teng J W, Si X, Wang Q S, et al. 2015. Collation and stipulation of the core science problems and theoretical concept in the geoscience

- study on the Tibetan plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(1): 103-124, doi: 10.6038/cjg20150109.
- Teng J W, Dong X P, Yan Y F, et al. 2016a. Geodynamic response of material movement and force source mechanism of various spheres in the Earth's interior. *Geological Review* (in Chinese), 62(3): 513-538.
- Teng J W, Song P H, Zhang X M, et al. 2016b. The driving force and movement of materials in the Earth's interior. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 61(18): 1995-2019.
- Teng J W, Qiao Y H, Song P H. 2016c. Analysis of exploration, potential reserves and high efficient utilization of coal in China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(12): 4633-4653, doi: 10.6038/cjg20161224.
- Teng J W, Ma X Y, Dong X P, et al. 2017a. An analysis of the accumulation and potential of oil and gas resources in the second deep space (5000~10000 m). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(8): 3191-3214, doi: 10.6038/cjg20170825.
- Teng J W, Liu Y S, Qiao Y H. 2017b. Study and exploration of the mixed-origin theories of organic and inorganic oil and gas. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(5): 1874-1892, doi: 10.6038/cjg20170522.
- ### 附中文参考文献
- 滕吉文. 2003. 固体地球物理学概论. 北京: 地震出版社.
- 滕吉文. 2003a. 20 世纪地球物理学的重要成就和 21 世纪的发展前沿. *地学前缘*, 10(1): 117-140.
- 滕吉文. 2003b. 地球深部物质和能量交换的动力过程与矿产资源的形成. *大地构造与成矿学*, 27(1): 3-21.
- 滕吉文, 张中杰, 白武明等. 2004a. 岩石圈物理学. 北京: 科学出版社.
- 滕吉文. 2004b. 向科学强国迈进中的地球物理学基础研究和创新理念. 中国大陆深部结构与动力学研究: 庆贺滕吉文院士从事地球物理研究 50 周年. 北京: 科学出版社.
- 滕吉文. 2005. 中国地球物理仪器和实验设备研究与研制的发展与导向. *地球物理学进展*, 20(2): 276-281.
- 滕吉文. 2006a. 当代中国地球物理学向何处去. *地球物理学进展*, 21(2): 327-339.
- 滕吉文. 2006b. 当代中国地球物理学的发展态势与在地球系统科学研究进程中的使命. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(5): 685-716.
- 滕吉文. 2006c. 强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发. *地质通报*, 25(7): 768-771.
- 滕吉文. 2006d. 中国地球物理仪器的研制和产业化评述. *石油物探*, 45(3): 209-216.
- 滕吉文, 杨辉, 张雪梅. 2006. 中国地球动力学研究的方向和任务. *岩石学报*, 26(11): 3159-3176.
- 滕吉文. 2007a. 当今中国地球物理学发展的机遇、空间和挑战. *物探化探计算技术*, 29(S1): 1-11.
- 滕吉文. 2007b. 中国地球物理学研究面临的机遇、发展空间和时代的挑战. *地球物理学进展*, 22(4): 1101-1112.
- 滕吉文. 2007c. 石油地球物理勘探的发展空间与自主创新. *石油物探*, 46(3): 213-225.
- 滕吉文. 2008. 当代地球物理学研究的核心科学问题和发展导向. *地球物理学进展*, 23(3): 637-640.
- 滕吉文, 田有, 刘财等. 2008a. 中国双相沉积盆地、古老结晶基底与东北地区深层潜在油气藏. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(4): 527-552.
- 滕吉文, 张雪梅, 杨辉. 2008b. 中国主体能源——煤炭的第二深度空间勘探、开发和高效利用. *地球物理学进展*, 23(4): 972-992.
- 滕吉文. 2009a. 中国地球深部物理学和动力学研究 16 大重要论点、论据与科学导向. *地球物理学进展*, 24(3): 801-829.
- 滕吉文, 白武明, 张中杰等. 2009a. 中国大陆动力学研究导向和思考. *地球物理学进展*, 24(6): 1913-1936.
- 滕吉文. 2009b. 关于设立“张衡计划”的建议一为中国地球物理仪器研发和产业化. *地球物理学进展*, 24(4): 1155-1166.
- 滕吉文, 阮小敏, 张永谦等. 2009b. 沉积盆地、结晶基底和油、气成因理念与第二深度空间勘探和开发. *地球物理学报*, 52(11): 2798-2817, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.015.
- 滕吉文, 姚敬金, 江昌洲等. 2009c. 地壳深部岩浆岩岩基体与大型、超大型金属矿床的形成及找矿效应. *岩石学报*, 25(5): 1009-1038.
- 滕吉文, 阮小敏, 张永谦. 2010. 地壳内部第二深度空间(5000~10000 m)石油与天然气地球物理勘探: 化石能源发展的必由之路. *地球物理学报*, 25(2): 359-375, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.02.001.
- 滕吉文. 2010a. 强烈地震孕育与发生的地点、时间及强度预测的思考与探讨. *地球物理学报*, 53(8): 1749-1766, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.001.
- 滕吉文. 2010b. 强化第二深度空间金属矿产资源探查, 加速发展地球物理勘探新技术与仪器设备的研制及产业化. *地球物理学进展*, 25(3): 729-748, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.03.001.
- 滕吉文. 2011. 地球内部物质、能量交换与资源和灾害. *地学前缘*, 8(3): 1-8.
- 滕吉文, 皮娇龙, 杨辉等. 2012a. 中国大陆动力学研究内涵与轨迹的思考. *地球物理学报*, 55(3): 851-862, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.015.
- 滕吉文, 张洪双. 2012b. 科学与技术的发展和创新的旨在为宇宙提供真正的写真. *地球物理学进展*, 27(3): 817-826, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.03.001.
- 滕吉文, 胡国泽, 杨辉等. 2012c. 学科交叉与交叉学科: 地球物理学在创新进程中的必然发展轨迹. *地球物理学进展*, 27(6): 2263-2278, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.06.001.
- 滕吉文, 杨辉. 2013. 第二深度空间(5000~10000 m)油、气形成与聚集的深层物理与动力学响应. *地球物理学报*, 56(12): 4164-4188, doi: 10.6038/cjg20131220.
- 滕吉文, 宋鹏汉, 毛慧慧. 2014. 当代大陆内部物理学与动力学研究的导向和科学问题. *中国地质*, 41(3): 675-697.

- 滕吉文, 司芾, 王谦身等. 2015. 青藏高原地球科学研究中的核心问题与理念的厘定. 地球物理学报, 58(1): 103-124, doi: 10.6038/cjg20150109.
- 滕吉文, 董兴鹏, 闫雅芬等. 2016a. 地球内部各圈层的物质运动与动力学响应和力源. 地质评论, 62(3): 513-538.
- 滕吉文, 宋鹏汉, 张雪梅等. 2016b. 地球内部物质的运动与动力. 科学通报, 61(18): 1995-2019.
- 滕吉文, 乔勇虎, 宋鹏汉. 2016c. 我国煤炭需求、探查潜力与高效利用分析. 地球物理学报, 59(12): 4633-4653, doi: 10.6038/cjg20161224.
- 滕吉文, 马学英, 董兴鹏等. 2017a. 第二深度空间(5000~10000 m)油气成藏和潜力分析. 地球物理学报, 60(8): 3191-3214, doi: 10.6038/cjg20170825.
- 滕吉文, 刘有山, 乔勇虎. 2017b. 石油双机(有机+无机)混合成因的研究与探索. 地球物理学报, 60(5): 1874-1892, doi: 10.6038/cjg20170522.

(本文编辑 胡素芳)