

doi: 10.11720/wtyht.2017.4.09

吴曲波,李子伟,潘自强,等.砂岩型铀矿地震勘探技术应用现状与发展[J].物探与化探,2017,41(4):648-655.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.09

Wu Q B, Li Z W, Pan Z Q, et al. Application status and future trend of seismic exploration techniques in sandstone uranium deposits[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 648-655. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.09

# 砂岩型铀矿地震勘探技术应用现状与发展

吴曲波<sup>1,2</sup>, 李子伟<sup>1,2</sup>, 潘自强<sup>1,2</sup>, 曹成寅<sup>1,2</sup>, 乔宝平<sup>1,2</sup>

(1.核工业北京地质研究院,北京 100029;2.中核集团 铀资源勘查与评价技术重点实验室,北京 100029)

**摘要:** 简要回顾了铀矿地震技术发展情况,基于近十几年来核地矿系统积累的砂岩型铀矿地震勘探工作成果,从采集、处理、解释方面介绍了我国砂岩型铀矿地震勘探技术的应用现状。通过与国内外同类技术发展水平的对比分析,找出了我们存在的诸多差距和不足,例如针对砂岩型铀矿成藏特点的地震采集方法研究不足,浅层地震数据处理成像精度不高,解释反演精度不高,砂岩型铀矿砂体的地震属性分析、叠前反演技术研究、目标砂体建模与正演等工作滞后。针对这些问题以及铀矿成矿特点,提出了优化采集面元、详细论证和试验覆盖次数、开发超浅层(小于 100 m)砂岩型铀矿地震处理技术和层间砂体弱信息提取技术、研究浅层去噪及高精度成像技术、开展含铀和非含铀砂体岩石物理建模研究以及目标砂体地震属性特征分析研究等对策和建议,以加快我国砂岩型铀矿地震勘探技术的发展。

**关键词:** 砂岩型铀矿;地震技术;应用现状;发展方向;产铀盆地

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2017)04-0648-08

## 0 引言

随着砂岩型铀矿勘查工作不断深入发展,面临的地质问题也越来越复杂,查明研究区深部地质结构和环境,以及评价研究区外围隐伏矿体成为当下铀矿研究人员亟需解决的问题之一,针对上述问题,开展了大量的地质和物探工作,相对而言地震勘探技术具有较高的勘探精度和纵横向分辨率,是最为有效的砂岩型铀矿攻深找盲技术手段之一。

相比于石油、煤炭领域,地震勘探技术应用于砂岩型铀矿勘查的时间较晚、经验不足,2000 年之前,铀矿地震勘探技术的应用研究成果很少,仅有核工业北京三所(现核工业北京地质研究院)等少数单位从事该方面的技术试验和理论研究,进入 21 世纪以来,随着铀矿勘查投入不断增加,核地矿系统单位应用地震勘探技术在最主要的 3 大产铀盆地(伊犁盆地、鄂尔多斯盆地、二连盆地)开展了一定量的砂

岩型铀矿二维地震勘探工作,取得了一定的技术研究成果和应用成效。

文中首先回顾铀矿地震勘探技术发展的历程;其次结合近些年核地矿系统在 3 大产铀盆地积累的地震勘探技术应用成果,介绍砂岩型铀矿地震数据采集、处理、解释技术的应用研究现状;最后通过与石油煤炭地震技术发展水平的对比分析,梳理核地矿系统地震勘探技术存在的差距和问题,给出几点发展建议。

## 1 砂岩型铀矿地震勘探回顾

早在 20 世纪 70 年代中期,核工业北京三所崔焕敏、王刚、焦宗润等人针对铀矿区首次采用能量叠加增强地震波信号的原理进行了地震勘探浅层反射波法试验和研究,同时完成了速度测井、震源优化选择和资料解释方法对比等大量方法试验工作,基于这些成果项目组还编著了《浅层地震探测方法与技

收稿日期: 2016-11-15;修回日期: 2017-05-17

基金项目: 中核集团“龙腾 2020”科技创新计划之核心能力提升专项资金项目(中核科发[2014]111 号)

作者简介: 吴曲波(1974-),男,高级工程师,从事砂岩型铀矿地震勘探技术应用研究工作。Email: wdyqthl@163.com

术》一书<sup>[1]</sup>;20世纪80年代初核工业北京三所崔焕敏、焦宗润等人使用地震技术进行铀矿控矿层位追踪的探索研究,简述了中浅层地震的方法原理,介绍了方法应用的地震地质条件,开展了实际应用试验,认为地震技术应用效果好<sup>[2]</sup>;徐文明等人在20世纪80年代相继开展铀矿地震勘探方法的探索性试验,试验表明在铀矿地质中做反射波地震勘探,能获得0.6 s、1 000 m以内地层的有效反射波同相轴,处理的时间剖面所反应盆地的基本形态的真实性与钻孔结果一致,为地震勘探法在铀矿勘查中的应用打下了基础,但该实验未能解决复杂地区的地质问题<sup>[3]</sup>;20世纪90年代初核工业北京三所梅汝吾、周超、徐贵来等人开发了地震勘探现场数据处理系统(CSP2.00版),该套系统先后在水电、有色金属、煤田及地震部门等7个单位进行推广应用,取得较好的口碑<sup>[4]</sup>,同时,梅汝吾、周超、徐贵来等人从速度信息入手探索研究砂岩型铀矿的岩性特征<sup>[5-6]</sup>;成都理工大学雷宛等人1998年以来在新疆准格尔盆地西北部进行的地震勘探工作为基础,从野外工作方法与技术、计算机数据处理方法与技术等方面,总结了适合于砂岩型铀矿的地震勘探方法与技术,认为应用波场特征、速度、三瞬参数等信息,结合工区的地质资料,可以确定一定厚度的“砂体”<sup>[7]</sup>。

进入21世纪以来,砂岩型铀矿地震技术研究和应用工作成果仍然集中在核地矿系统内部,也是在此时间点,核地矿系统才真正意义上开始进行常规的砂岩型铀矿反射波地震勘探工作。2004~2013年核工业航测遥感中心王利民、徐国苍、刘波等人在二连盆地马尼特凹陷、乌兰察布凹陷完成了一定量的二维地震勘探剖面,通过处理解释,基本查清了区内构造格架,对区内铀矿找矿方向提供了线索,基本掌握了可地浸砂岩型铀矿勘查中的浅层地震数据采集、处理技术及解释方法,利用浅层地震勘探所获取的各种信息,能够解决研究区地层、岩性、岩相划分和断裂构造解释等铀成矿环境问题<sup>[8-10]</sup>。2010~2012年核工业北京地质研究院(以下简称核地研院)徐贵来等人针对二连盆地铀矿埋藏浅等特性,提出了二连盆地砂岩型铀矿超浅层地震数据处理技术,拓展了浅层地震数据处理的思路,其使用低频检波器接收地震波尽量保留面波信息,利用面波数据反演浅层速度,但是反演的深度有限,精度有待提高<sup>[11]</sup>;吴曲波等人以二连盆地齐哈日格图地区古河道砂岩型铀矿探测为例,开展地震技术探测古河道的试验研究,通过地震相、地震属性分析以及波阻抗反演技术,联合控制测线组上段古河道的平面展布

情况<sup>[12]</sup>;吴曲波等人,以二连盆地齐哈日格图凹陷为试验区,开展基于锤击震源的小折射地表调查试验研究,得到了一套适用于该区的锤击小折射法的观测系统参数,并开展了实际地表调查工作,锤击小折射解释结果与井炮小折射记录的解释结果、钻孔资料、高密度电法测量结果具有较好的对应关系,精度较高,据此建立了一套快速、有效、经济的地表调查方法<sup>[13-14]</sup>。2010年核工业二〇八大队薛志恒,基于东胜铀矿区地震数据,应用测井约束反演技术建立了砂体与反演参数之间的对应关系,得到较为理想的地质剖面,为铀矿找矿工作提供了可靠的指导<sup>[15]</sup>。2010~2013年核地研院程纪星、易超、吴曲波,以及二〇八大队苗爱生等人在鄂尔多斯盆地开展了共约300 km二维地震剖面测量工作,基本摸清了研究区地层及构造分布,同时开展了基于波阻抗反演的砂体识别技术及其物理属性研究,对探查该区砂岩型铀矿砂体展布特征奠定坚实基础<sup>[16-18]</sup>;吴曲波等人针对鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿地震勘探的难点,开展地震数据采集、处理和解释技术试验及应用研究,通过大量的野外地震勘探和处理解释试验工作,总结了适用于该区砂岩型铀矿的地震探测技术手段,提高了地震方法在该区砂岩型铀矿勘查中的应用效果<sup>[19]</sup>;吴曲波和李子伟针对砂岩型铀矿地震勘探砂体识别过程中存在砂泥薄互层分辨难、目标层埋藏深度浅且地震资料信噪比低、以及波阻抗反演中缺少必要的声波曲线这3个问题,制定了适用的解决方案,包括:提高数据采集质量的措施、提频处理、精细去噪和速度分析、拟声波曲线合成技术,最后利用波阻抗反演技术对目标层砂体进行反演识别,取得了较好的应用效果<sup>[20]</sup>。潘自强等人,针对伊犁盆地地震数据处理中的关键技术方法进行了较深入研究,主要包括静校正、叠前叠后去噪、反褶积、速度分析、偏移等处理过程及相关处理参数的试验,建立了合理的处理流程,进行实测数据处理,取得较好的效果<sup>[21]</sup>。2010~2013年核地研院刘红旭、李子伟、吴曲波等人,以及核工业216大队高晓伟等人在伊犁盆地南缘蒙其古尔、洪海沟、乌库尔奇等地区开展了共约400 km的二维地震勘探工作,通过对工区地震资料的解释,查明了工区地层展布特征、断裂构造分布以及头屯河组和水西沟群的砂体展布特征,该地震工作取得了较好的效果,通过验证地震反演可识别研究区10 m以上厚度的砂体,同时提交了研究区的砂体展布规律图,可为工区铀成矿前景预测提供依据<sup>[22-25]</sup>。2015年吴曲波等人在二连盆地开展了核地矿系统第一片三维地震工

作,面积 10.89 km<sup>2</sup>,建立了一套较适用于砂岩型铀矿的三维地震勘探技术体系,从此也翻开了核工业系统三维地震的新篇章,具有里程碑意义<sup>[26]</sup>。核系统之外,主要有陕西煤田系统的冯西会等人讨论了高分辨率地震技术在铀矿勘探中的应用效果<sup>[27]</sup>。

## 2 采集技术应用研究现状

砂岩型铀矿地震数据采集技术主要借鉴同等深度的煤炭地震采集技术,以常规的地震采集方案为主,但砂岩型铀矿地震数据采集需着重考虑矿体埋深浅(一般在 1000 m 以内,局部地段达到 100 m 以内)以及目标层砂体与围岩物性差异小等特点,因此,采集中基本使用小道距、小药量、可控震源宽频激发、少量检波器组合接收等观测方式,覆盖次数相对于石油或煤炭地震勘探所使用的低,在 40 次以下。简要介绍 3 大盆地地震采集技术应用现状:

1) 伊犁盆地砂岩型铀矿地震工作开始于 2009 年,采集的数据全部为二维地震数据,线距基本在 5 km 左右,研究区主要分布在蒙其古尔、洪海沟、乌库尔奇等地区。研究区地表以冲沟和丘陵为主,地震施工条件一般,深部发育多套煤层,这些煤层是区域性的标志层位,中深层地震地质条件较好。结合此地地震地质条件,该区地震激发主要采用炸药,井深 6~8m,激发药量为 2 kg,中间激发,接收方式主要采用 4 个 60 Hz 的检波器点式组合接收,接收仪器主要采用 Summit II Plus 或 408UL 系统,采集道距主要为 20 m 或 10 m,接收道数主要为 96 道或 150 道,炮点距为 40 m,覆盖次数主要为 20~24 次。

2) 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿地震工作开始于 2010 年,采集的二维地震剖面线距较大,在 10~20 km 之间,主要为普查性地震工作,研究区主要分布在盆地北部东胜地区。研究区地表地貌特征属高原侵蚀性丘陵,大部分为低矮山丘,半荒漠地区,便于车辆通行;该区浅表层上百米厚的第四系覆盖层对地震勘探施工的激发和接收极为不利,浅层地震地质条件较差。该区深层白垩系地层底部有一套厚度稳定的砂砾岩,以及该区延安组的煤层,均可作为工区稳定的标志层,故该区深层地震地质条件较好。结合此地地震地质条件,该区地震激发源可用炸药和可控震源,中间激发,炸药激发井深 12 m,激发药量为 2 kg,可控震源激发一般采用两台震源交替激发的方式进行作业,扫描频带较宽,最高频率至 115 Hz,扫描时间和振动次数只要保证浅层目标层的信噪比即可,不过长和过多,接收方式主要采用点式

组合的接收方式,个数一般为 3 个、6 个或 10 个,频率一般为 60 Hz 或 10 Hz,近些年的采集方案中更倾向于多个检波器低频接收,接收仪器主要采用 Secerl 428XL,IMAGE 或 ARIES 系统,集道距为 10 m,接收道数主要为 144 道或 240 道,炮点距为 30 m,覆盖次数主要为 24 次或 40 次。

3) 二连盆地相对其他两个盆地开展砂岩型铀矿地震工作的时间较早,可以追溯到 2004 年左右,那时候核地矿系统使用的地震数据采集仪器设备相对落后、道数较少,致使采集数据的覆盖次数较低,大都在 6 次左右,如今该盆地各核系统单位已开展了一定量的二维地震工作,覆盖次数多以 24 次为主,以及核工业北京地质研究院于 2015 年开展了第一片三维地震工作(面积 10.89 km<sup>2</sup>),标志着砂岩型铀矿地震工作翻开了新的篇章。该盆地的研究区主要分布在马尼特凹陷和乌兰察布凹陷等地区。相比于上述两大盆地,二连盆地研究区地表施工条件最优,地表激发条件也较好,中深层地震地质条件也较好,新生界古近系与中生界白垩系之间有一个区域性不整合面,二连组底部砂砾岩与赛汉组上部泥岩形成的强阻抗界面,以及赛汉组上段与下段的强阻抗界面,这些界面均可作为该区地震勘探标志层位。由于该区施工条件较好,该区主要采用可控震源激发施工。采用两台交替扫描的方式作业,扫描频率多使用 10~96 Hz,并采用低震动次数和中等扫描时间长度,如采用炸药激发震源,则使用单井激发,井深 5m,激发药量为 1 kg,接收方式主要采用 3 个 40 Hz 的检波器点式组合或 12 个 10 Hz 的检波器点式组合接收,接收仪器主要采用 Strata Visor NZXP24-ES,IMAGE 系统,采集道距主要使用 10 m,接收道数从早些年 48 道到 96 道、144 道,炮点距为 40 m 或 30 m,覆盖次数由早些年 6 次到 12 次、24 次。

2015 年,核地研院于二连盆地开展了第一片砂岩型铀矿三维地震数据采集工作,这也是核地矿系统第一次敲开三维地震勘探之门,具有重要的意义。三维地震勘探观测系统使用小面元(5 m×10 m)、高覆盖(128~136 次)、宽方位(纵横比为 0.96)等参数,增强了探测效果,同时强化的观测系统可为后续弱化研究提供基础资料。激发采用可控震源进行施工,检波器使用 10 个 10 Hz 的检波器点式组合接收,接收仪器使用 Secerl 428XL 系统。

总体而言,三大盆地这些年采用的地震采集技术主要沿用和借鉴煤炭地震技术经验,均属于常规的采集技术。其中使用炸药激发且覆盖次数较高的地震原始资料品质相对较好,比如伊犁盆地采用炸

药激发且覆盖次数达到24次,得到的资料品质相对最高,该区地震原始单炮中可见较为清晰的目标层位的反射波同相轴;鄂尔多斯盆地获得的地震原始资料受浅层巨厚的低降速带的影响,致使处理的叠加偏移剖面的品质不高,尤其是分辨率较低;二连盆地地质条件相对较复杂,但由于地表激发、接收条件较好,以及较好的中深层地震地质条件,采用可控震源和炸药震源均可获取品质较好的地震原始资料,但以往该区使用的覆盖次数普遍较低,资料的信噪比不高。

### 3 处理技术应用研究现状

砂岩型铀矿地震数据处理工作主要针对矿体埋藏浅、目标层地震信号信噪比不高、面波声波以及线性干扰发育等特点开展处理技术试验和应用研究,主要的处理环节包括以下几个方面:

首先,在静校正方面,从这些年采集的地震资料看,二连盆地静校正问题相对轻,使用常规高程静校正、折射波静校正方法可以较好地解决。鄂尔多斯盆地和伊犁盆地静校正问题较重,鄂尔多斯盆地是由于浅层巨厚的低降速带引起的静校正量,一般在该区使用折射波静校正法叠加3次以上剩余静校正才可基本解决存在的静校正问题,但剖面仍然存在目标层同相轴、初至波不平整现象,在折射波静校正应用效果不佳的局部地段采用手动调整初至,以提升静校正处理效果。伊犁盆地主要是受地形影响,静校正问题较为突出,通过试验发现:在地表平整地段,层析静校正和折射波静校正效果相当;在老地层出露区,高程静校正比其他方法效果好,因此,该区主要采用折射静校正和高程静校正相结合的方式,并配合多次剩余静校正处理,以解决静校正问题。

其次,是去噪问题,砂岩型铀矿埋藏浅致使在使

用激发源时多考虑使用浅井或可控震源激发,带来了大量的面波、声波、线性干扰,因此砂岩型铀矿地震数据去噪多从这3类噪声下手:①针对一些道的强能量干扰,提出一种非线性自适应噪声检测及压制方法,这种处理能有效地减小信号的畸变,使各种强能量干扰得到很好的压制,同时不损失有效波成分。②针对面波干扰,核地研院采用基于小波变换的弹性建模自适应面波衰减技术,对原始资料中的面波进行去除,取得了较好的应用效果。③针对线性噪声,根据频率与速度设计一个多道滤波器,利用其视速度差异大、相干性强、能量强的特点采用线性噪声衰减及信噪分离技术,在频率—空间域对线性噪声进行预测并从记录中减去,能够有效地对倾斜干扰等进行衰减,提高记录信噪比与可视性。图1为去噪前后对比,可见砂岩型铀矿地震单炮数据受浅层噪声影响较重,通过上述去噪方法的处理,可取得较好的去噪效果。

第三,反褶积处理方面,砂岩型铀矿地震数据解释对于资料的分辨率提出了较高要求,因此在反褶积处理阶段对于提高信号的分辨率尤为重要,在进行反褶积处理试验中得知,使用地表一致性反褶积+单道预测反褶积的组合方式可以适当地提高单炮资料的频率和带宽,对于后期砂体反演解释意义重大。

第四,偏移处理方面,由于砂岩型铀矿地震工区构造变化相对较小,因此较少使用叠前偏移处理,主要采用叠后时间偏移处理解决构造归位问题。

针对上述关键环节的处理试验和应用研究,也逐步形成了一套较为常用的砂岩型铀矿地震数据处理流程,使用该套流程使得数据处理效果得到一定提升(如图2所示)。

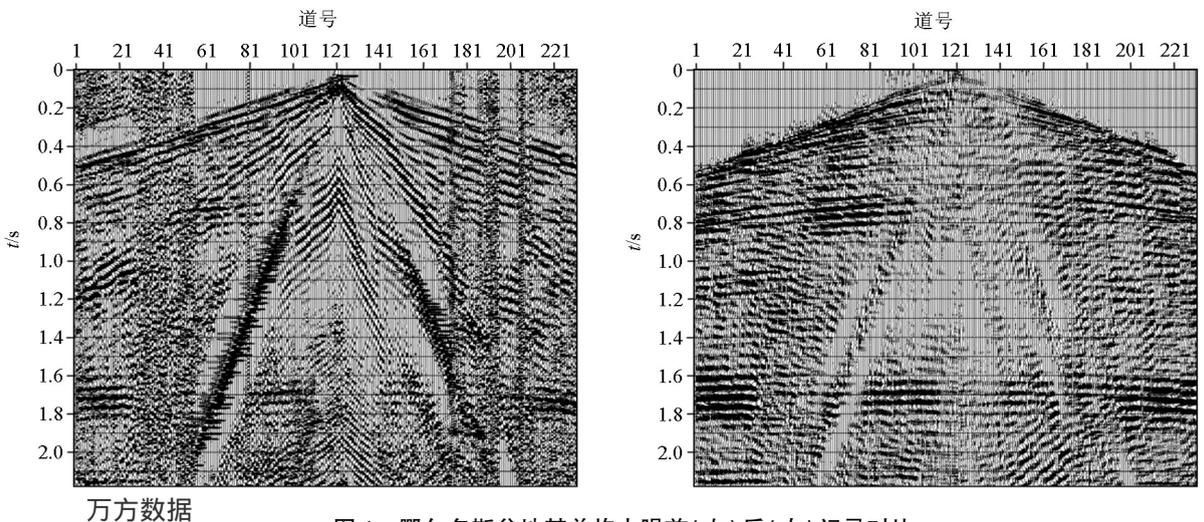


图1 鄂尔多斯盆地某单炮去噪前(左)后(右)记录对比

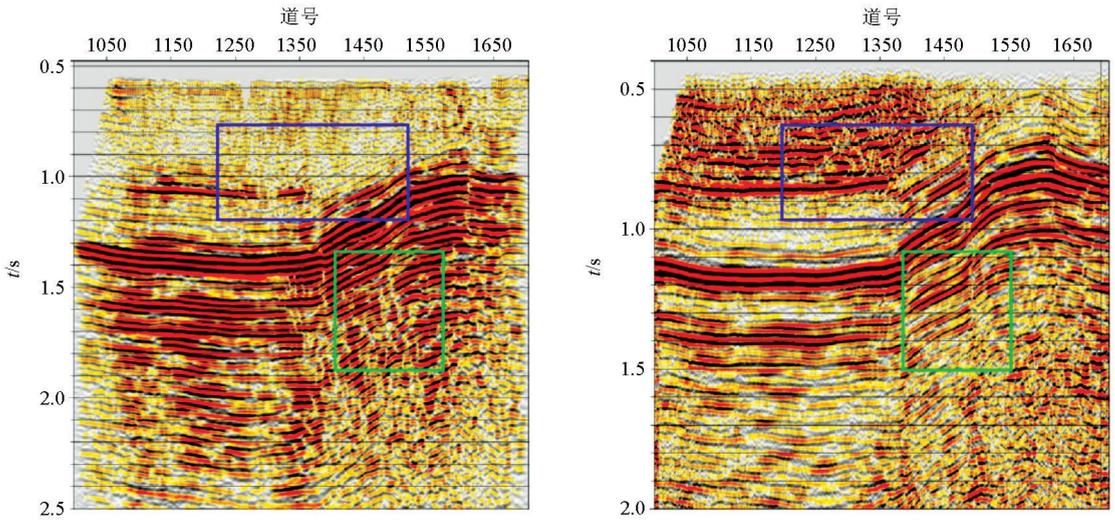
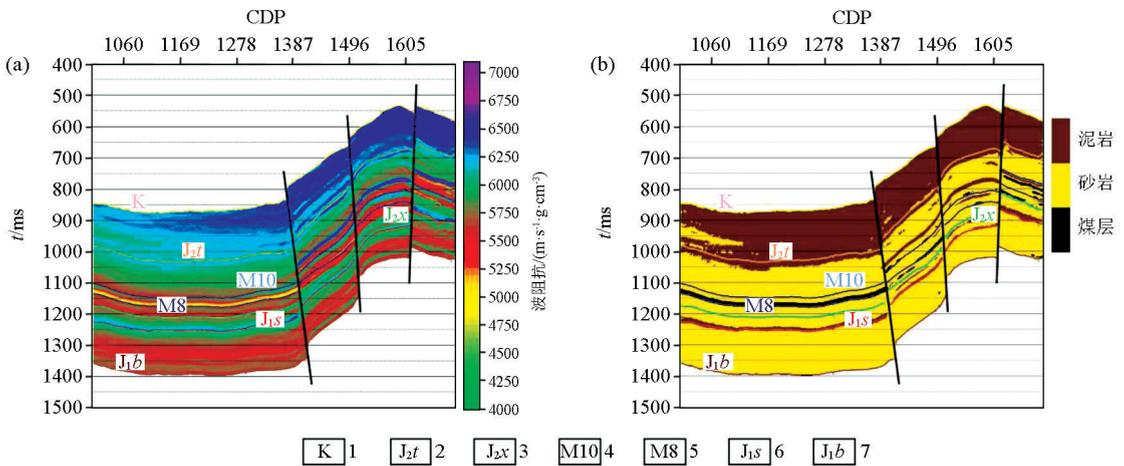


图2 伊犁盆地某测线老(左)新(右)剖面对比

### 4 解释技术应用研究现状

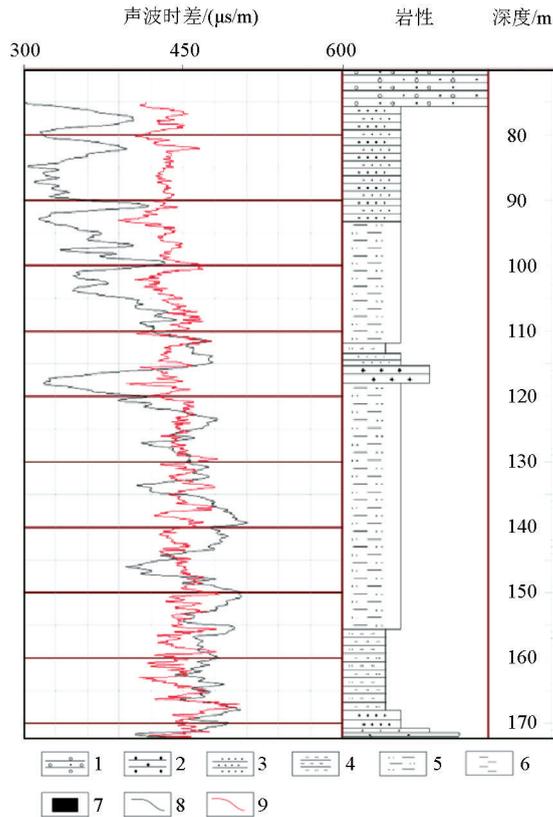
目前,砂岩型铀矿地震解释的目标主要是查清含矿地层展布形态和构造发育情况,以及目标层砂体的发育情况。调查地层和构造的分布情况属于常规地震解释的内容,采用的方法多为常规解释方法,从井震标定到同相轴追踪解释再到构造成图,而在目标层砂体解释领域,以往核地矿系统主要从地震相特征和“三瞬”属性特征入手,定性解释砂体大致发育情况,近些年,核地矿系统引进了石油煤炭地震领域广泛使用的波阻抗反演技术对目标层砂体的发育情况进行定量刻画,同时对目标层岩石的物理性质进行研究,例如波阻抗、渗透率、孔隙度、速度等参数,图3为使用波阻抗反演技术得到的剖面波阻抗

和岩性分布图,相比以往使用地震相定性解释砂体,该岩性分布图可定量刻画剖面的砂体分布规律,砂体解释精度得到了提升。在波阻抗反演技术应用过程中,主要使用基于模型的叠后波阻抗反演方法,该方法的一个重要基础是声波数据,而在砂岩型铀矿测井工作中往往不开展声波测井,或声波测井数据受浅层地层影响质量不高,而声波数据的质量直接影响着叠后波阻抗反演计算的精度,因此,在实际应用中采用拟声波重构技术利用现有的各种参数的测井数据,重构声波曲线,以弥补声波测井数据的缺失或质量不高,如图4所示重构的声波曲线(红色)比实际声波曲线(黑色)更好地反映地层岩性的变化细节,因此使用拟声波数据进行地震反演计算,可以提高反演结果的分辨率,提升砂体预测准确度。



1—白垩系;2—侏罗系头屯河组;3—侏罗系西山窑组;4—第十煤层;5—第八煤层;6—侏罗系三工河组;7—侏罗系八道湾组  
 万方数据

图3 伊犁盆地某剖面波阻抗反演(a)和岩性反演(b)结果



1—砂砾岩;2—粗砂岩;3—砂岩;4—细砂岩;5—砂泥岩;6—泥岩;7—煤层;8—实测声波曲线;9—拟声波曲线

图4 某井声波曲线与拟声波曲线反映地层岩性变化的对比

## 5 存在问题及发展建议

最近十年砂岩型铀矿地震勘探积累了大量的成果,取得了一定的技术进步,但相比于成熟的地震技术,砂岩型铀矿地震勘探研究和应用仍然处于初级阶段,存在诸多问题和不足,主要有以下几个方面:

1) 地震采集方面。砂岩型铀矿的成矿地质条件有埋藏浅、物性差异小、砂泥互层等特点、难点,但砂岩型铀矿地震数据采集方案针对性不强,沿用和借鉴以往或其他系统的地震采集经验可能会出现问题;以往砂岩型铀矿地震原始资料的覆盖次数普遍偏低,而砂岩型铀矿地震资料采集往往受浅层噪声的影响大,资料信噪比较低,提高资料覆盖次数的意义明显,但覆盖次数提升将显著增加勘探成本,与核地矿系统降本增效的思路相悖;野外数据采集施工质量有待提升。

2) 处理方面。处理手段多沿用煤炭地震处理技术,没有针对砂岩型铀矿的数据特点开展针对性研究,例如基于超浅层(小于100 m)的地震数据处理技术研究、砂体弱信息恢复技术研究等等,石油煤炭地震系统许多常规的处理方法仍未列入砂岩型

铀矿地震处理流程,如层析静校正、叠前时间和深度偏移等等。

3) 解释反演方面。地震资料解释反演的精度仍然不高,其间存在的问题较多,如测井数据的质量、处理结果的质量、反演方法的有效性等。目标层地震属性分析研究工作不足;叠前反演技术在目标层岩石物性分析中未能发挥出较好的作用;含铀砂体和非含铀砂体的岩石物理性质及差异仍然没有调查清楚。

鉴于这些问题,笔者抛砖引玉提出几点建议:

1) 地震资料采集是整个地震勘探的基础,应设计针对砂岩型铀矿特点的合适的地震采集方案,详细分析研究砂岩型铀矿埋藏浅、物性差异小、薄互层多等特点如何影响地震数据的采集,从地震采集原理出发试验研究解决这些难点的采集方案,采集参数中尤其需充分论证面元尺度和覆盖次数的合理性,这两者是影响勘探效果和成本的最直接因素,面元尺度可以基于以往地震资料、地质资料进行理论计算和实际面元分析得到较为合适的范围,而覆盖次数至今在砂岩型铀矿领域未有较为详细地论证,应针对高覆盖次数的原始数据进行弱化处理,将不同弱化处理结果进行解释反演,再对比解释反演结

果得出较适当的覆盖次数值域范围。尽管砂岩型铀矿地震数据采集规模不大,但震源激发方面仍然可以借鉴石油系统的滑动扫描技术、点源驱动技术节省勘探成本。在提高地震勘探分辨率方面,可以考虑采用煤炭系统常用的数字检波接收方式提升采集资料的品质,从而提升勘探精度。砂岩型铀矿地震勘探中有效波的信号较微弱,野外施工过程中应着重注意压制采集噪声,提高检波器埋置质量、避开人文噪声施工是关键,同时施工中应逐个检查炮检点的到位率,检查钻井深度和下药质量,监控现场单炮数据质量,这些工作虽简单但是保障地震原始资料品质的有效手段。

2) 砂岩型铀矿地震处理解释反演的最终目标是准确预测砂岩型铀矿靶区,目前核地矿系统开展的地震工作均是常规地震数据处理和构造解释工作,要达到上述目标,技术有待提高。首先,根据砂岩型铀矿地震数据特点研发一套有针对性的地震处理技术,比如砂岩型铀矿超浅层(100 m以内)地震数据处理技术,层间砂体弱信息提取技术,浅层去噪及高精度成像技术等针对性的技术开发;其次,基于测井和地质资料准确分析研究区地层和构造分布情况,这一部分主要对测井数据的质量提出了高要求,由于砂岩型铀矿测井数据质量普遍不高的缘由,一方面我们应该提高测井工作的质量,并开展全面系统的测井工作,另一方面在成果应用时应严格查对测井数据与岩性的对比情况;第三,利用测井资料和地震数据反演识别目标层砂体,这一步的关键是岩石物理性质的分析,找准区分岩性的物性参数是开展砂体识别的关键;第四,建议应该利用地震数据提取多种属性开展研究区沉积相特征分析研究,特别是开展富矿沉积相体的研究,同时还可利用属性数据刻画对研究成矿有重要影响的古河道展布和演变规律;第五,还应开展具有统计意义的砂岩型铀矿样品的物理性质分析和研究,建立模型数据开展正演模拟研究,可明确的是含铀砂体和非含铀砂体的物理性质存在差异,但此物性差异是否可由地震信号反映,这是我们今后应该研究的关键,如存在可探测的差异,则可基于此物性差异,利用相关的解释、反演技术直接预测含铀砂体的发育范围。

3) 如今,石油煤炭地震技术发展已趋于成熟,如何有效地借鉴石油和煤炭成熟的地震技术,是应该着重考虑的一部分,很多实用技术可完完全全引进消化吸收,但有些技术存在不适用性,这是需要铀矿地震技术人员进行创新的地方,尤其针对砂岩型铀矿埋藏浅、砂体信息弱、薄互层多等特点、难点,开

展针对性开发试验和应用研究,逐个难点一一梳理、击破,形成一套具有砂岩型铀矿特色的地震勘探技术,这才是铀矿地震的核心技术。

### 参考文献:

- [1] 崔焕敏,王刚,焦宗润.浅层地震方法在铀矿地质工作中的应用与研究[R].北京:核工业北京第三研究所,1978.
- [2] 崔焕敏,焦宗润.研究利用地震探测技术在潮水等地区追索铀矿控矿层位[R].北京:核工业北京第三研究所,1981.
- [3] 徐文明,向德龙.铀矿地震勘探方法的试验与研究[J].放射性地质,1982,(5):442-450.
- [4] 梅汝吾,周超,徐贵来.地震勘探现场数据处理系统研究成果报告[R].北京:核工业北京第三研究所,1991.
- [5] 梅汝吾,徐贵来,周超.砂岩铀矿地震岩性探测研究[R].北京:核工业北京第三研究所,1996.
- [6] 徐贵来,梅汝吾.二连盆地找铀沉积层位的地震勘探研究[J].铀矿地质,1997,13(4):226-231.
- [7] 雷宛,康贤,肖宏跃.砂岩型铀矿地震勘探方法技术研究[J].西安工程学院学报,1998,20(S):14-17.
- [8] 王利民,徐国昌.内蒙古二连盆地马尼特坳陷伊和高勒一代喇嘛庙地区浅层地震勘探报告[R].石家庄:核工业航测遥感中心,2004.
- [9] 徐国苍,张红军,朱琳.浅层地震勘探在砂岩型铀矿勘查中的应用研究[J].铀矿地质,2013,29(1):37-46.
- [10] 徐国苍,刘波,吴同海,等.内蒙古苏尼特左旗巴彥乌拉东部地区浅层地震勘探[R].石家庄:核工业航测遥感中心,2011.
- [11] 徐贵来,吴曲波,潘自强.二连盆地浅层地震技术研究[R].北京:核工业北京地质研究院,2012.
- [12] 吴曲波,刘武生,李子伟,等.地震勘探技术在定位古河道中的试验[J].铀矿地质,2015,31(S1):193-197.
- [13] 吴曲波,曹成寅,潘自强,等.锤击小折射法地表调查的试验效果[J].物探与化探,2016,40(2):380-384.
- [14] 吴曲波,曹成寅.使用锤击震源的小折射表层调查中的采集参数试验[J].工程地球物理学报,2015,12(2):229-233.
- [15] 薛志恒.浅层地震勘探在砂岩铀矿勘查中的应用[J].河南理工大学学报:自然科学版,2010,29(S):170-171.
- [16] 程纪星,乔宝强,易超.泊江海子浅层地震测量报告[R].北京:核工业北京地质研究院,2010.
- [17] 易超.柴登壕浅层地震测量报告[R].北京:核工业北京地质研究院,2010.
- [18] 吴曲波,李子伟,潘自强.东胜地区重点地段铀成矿条件浅层地震探测技术研究报告[R].北京:核工业北京地质研究院,2013.
- [19] 吴曲波,李子伟,潘自强.鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿地震探测技术应用研究[J].铀矿地质,2016,32(2):104-109,122.
- [20] 吴曲波,李子伟.砂岩型铀矿地震勘探中砂体识别的几个问题[J].中国核科学进展报告,2015,4(1):198-203.
- [21] 潘自强,徐贵来,吴曲波,等.砂岩型铀矿勘探中的地震资料高分辨率处理方法[J].工程地球物理学报,2015,12(2):246-253.
- [22] 李子伟,吴曲波,潘自强,等.伊犁盆地南缘地震数据处理与解释研究报告[R].北京:核工业北京地质研究院,2014.

- [23] 高晓伟,屈有恒,刘磊,等.新疆伊犁盆地南缘可地浸砂岩型铀矿远景调查二维地震勘探[R].乌鲁木齐:核工业 216 大队,2012.
- [24] 刘红旭,高晓伟,田思清,等.伊犁盆地蒙古其古尔以东—吉尔乔喀地区浅层地震测量报告[R].北京:核工业北京地质研究院,2011.
- [25] 刘红旭,高晓伟,田思清,等.新疆察县蒙古其古尔地区二维地震勘探[R].北京:核工业北京地质研究院,2010.
- [26] 吴曲波,潘自强,李子伟,等.砂岩型铀矿三维地震勘探技术开发及应用研究[R].北京:核工业北京地质研究院,2015.
- [27] 冯西会,王中锋,唐建益,等.用于铀矿勘探的高分辨率地震技术[J].物探与化探,2007,31(S):19-23.

## Application status and future trend of seismic exploration techniques in sandstone uranium deposits

WU Qu-Bo<sup>1,2</sup>, LI Zi-Wei<sup>1,2</sup>, PAN Zi-Qiang<sup>1,2</sup>, CAO Cheng-Yin<sup>1,2</sup>, QIAO Bao-Ping<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. CNNC Key Laboratory of Uranium Exploration and Evaluation Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** This paper gives a brief review of the seismic technology development level in uranium exploration, and describes the application status of seismic exploration technology for sandstone type uranium deposits in China from the aspects of collection, processing and interpretation based on the results of seismic exploration work in nuclear geological system in recent years. Through the comparative analysis of the development level of similar technologies in China and abroad, the authors have found out the gaps between China and countries abroad in this field. Here are some examples of China's shortcomings in this field: lack of studying seismic acquisition methods for sandstone type uranium deposits, relatively low precision of shallow seismic data processing and interpretation accuracy, backwardness in such aspects as the work of seismic attribute analysis of sandstone type uranium ore body, prestack inversion technology research, and target sand body modeling. Aiming at tackling these problems and considering characteristics of uranium mineralization, the authors put forward some countermeasures and suggestions for speeding up the development of seismic exploration technology of sandstone type uranium deposits in China, such as optimizing the acquisition surface, detailed demonstration and testing of the coverage, developing the seismic processing technology for ultra shallow (less than 100 m) sandstone type uranium deposits and weak information extraction technology of interlayer sand, research on the technology of shallow noise removal and high precision imaging, study of the physical modeling of uranium and non-uranium bearing sandstone and analysis of the seismic attributes of the target sand body.

**Key words:** sandstone type uranium deposit; seismic technology; application status; development direction; uranium producing basin

(本文编辑:叶佩)