

WFSD-4 孔深部流体分析和多组分地球化学特征

唐力君¹⁾, 劳昌玲^{1,2)}, 范 凡¹⁾, 王 健¹⁾, 王 广¹⁾

1) 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037; 2) 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074

摘 要: 采用场内钻探流体实时分析和场外钻探泥浆分析的方法, 获得汶川地震断裂带科学钻探工程 4 号钻孔(WFSD-4)中深部井段流体多组分分析结果。研究钻孔深部井段的流体剖面地球化学特征, 认为来自地下深部流体在钻探过程中会保存在钻探循环泥浆中, 随钻流体实时分析可记录明显的组分变化信号。钻孔岩心的岩性变化易引起钻探泥浆气体的变化, 特别是钻探泥浆气体中的多组分变化, 在钻孔岩性裂隙较为丰富的井段, 是钻探泥浆气体组分变化强度较大区间。通过比较钻探泥浆的多组分和岩心岩性的弱相关性, 可以推测钻探流体与余震相关性较强的区域和周期, 更可能获得钻探流体与余震的相关程度。

关键词: 流体实时分析; 场外分析; 汶川科钻; 泥浆气体; 地球化学

中图分类号: P631.818; P631.815 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2015.04.06

Fluid Analysis and Multi-component Geochemical Features in the Depth of Drill Hole WFSD-4

TANG Li-jun¹⁾, LAO Chang-ling^{1,2)}, FAN Fan¹⁾, WANG Jian¹⁾, WANG Guang¹⁾

1) National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074

Abstract: Both in-site real-time fluid analysis and off-site drilling mud analysis were used to detect the multi-components in the depth of drill hole WFSD and the profiles of multi-components in the drilling mud and other media during drilling. Through the comparison of fluid profile in the depth of the drill hole, the underground fluid geochemistry was discussed in the paper. The fluid from deep underground would be kept in the cycling mud during the drilling process. The further study of drilling mud gas, liquid and solid samples would be helpful to the determination of invasion of underground fluids in various ways. At the same time, the real-time fluid analysis during drilling would record the distinct signal change of components in the cycling mud. The lithologic variation of drilling core would easily cause the change of drilling mud gas, especially the change of multi-components in drilling mud gas. The lithologic section of relatively abundant fissures in the drill hole is the interval of greater drilling mud gas change. The indistinct correlation between multi-components of drilling mud gas and lithology of drilling core was comparatively studied, and the result could indicate the exact region and period in which the correlation of drilling fluid and aftershock was stronger, and this could be helpful to achieving the real degree of correlation between drilling fluid and aftershock.

Key words: real-time fluid analysis; off-site analysis; Wenchuan Earthquake Fault Scientific drilling; mud gas; geochemistry

实施大型科学钻探工程是国家科技战略之一, 也是国家科学研究水平和工程技术能力的一种体现, 得到中外科技工作者的关注(Jorg and Stober, 2005; 许志琴等, 2008)。汶川地震断裂带科学钻探工程

(WFSD)是围绕大地震而进行的钻探工程, 在我国也是首次实施此类科钻工程, 尽管地震预报的难度很大, 但是人类不能停止对其的探索和认识, 特别是我国作为发展中国家, 需要不断利用新的科学技

本文由国家科技专项“汶川地震断裂带科学钻探工程”课题(编号: 0008; 0003)资助。

收稿日期: 2015-01-30; 改回日期: 2015-05-10。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 唐力君, 男, 1976 年生。副研究员。主要从事现场流体地球化学分析。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。

电话: 010-68999559。E-mail: tanglijun@cags.ac.cn。

术,不断探索新的途径来提升对地球内部活动机理的认识(许志琴等, 2005; 李民, 2007; 车用太等, 2008; 董树文等, 2009)。

流体,特别是地下流体,是地球内部的最活跃物质,其与地球内部活动关系密切(张泽明, 1998; 罗立强等, 2004a, b; Tang et al., 2014)。地球内部存在着力学和物理化学方面的动态平衡,在地球内部活动时,通过地球内部固、液、气的相互作用、能量传递和物质交换,把深部信息传递到地球浅部区域,从而更容易被研究人员发现(李民, 2007; 董树文等, 2008; 魏乐军等, 2008; 周晓成等, 2012)。

随钻流体实时分析是近似深入到地球内部的一种分析监测技术,能随着钻探工程钻孔的深度而不断获得地球内部不同深度的流体信息(罗立强等 2004a, b; Luo et al., 2004; 许志琴 et al., 2005)。国内外的气体组分与地震前兆关系研究目前已以土壤气、天然地表水和地表气体为对象开展研究工作,但这些研究对象主要监测范围在地表以下较浅的部分(魏乐军等, 2008; 车用太等, 2008)。从钻探工程的钻孔中获得的流体多种组分信息,将更不易受到地表其他因素干扰,更能准确获得地表以下、地下较深处的地球内部活动,从而为地震监测或预警提供最直接的来自地下的基础数据(唐力君等, 2010, 2011; Tang et al., 2014, 孙青等, 2005; 王焕等, 2010; Tang et al., 2014)。

本文依托汶川地震断裂带科学钻探工程 4 号孔(WFSD-4)的随钻流体实时分析数据和所采集的流体样品,进行场内实时分析和场外分析,包括使用气体质谱仪进行场内钻探泥浆气体的随钻实时分析和使用原子荧光光谱法进行场外钻探泥浆固体、液体中汞的检测(唐力君等, 2006, 2010, 2011),获得流体多种分析数据,并对这些实时分析数据和场外分析数据进行分析 and 对比,获得流体与钻孔岩性和构造活动的关系。

1 WFSD-4 孔钻探和现场流体分析

汶川地震断裂带科学钻探工程在汶川大地震和复发微地震的源区——龙门山断裂带实施了数口中-浅科学群钻,对钻探的岩芯、岩屑和流体样品进行多学科观测、测试和研究(许志琴等, 2008; Li et al., 2013, 2014),其中 WFSD-4 钻孔是科学群钻的主孔之一,如图 1(Li et al., 2013; 唐力君等, 2013),位于四川省平武县南坝镇旧洲村,距龙门山地表断裂带约 1.9 km。WFSD-4 于 2012 年 8 月 6 日开钻,2014 年 2 月 11 日完钻,钻孔井深 2338.77 m。

伴随着钻探工程,WFSD-4 钻孔的钻探现场流体实时分析也同步进行。钻探现场流体实时分析采

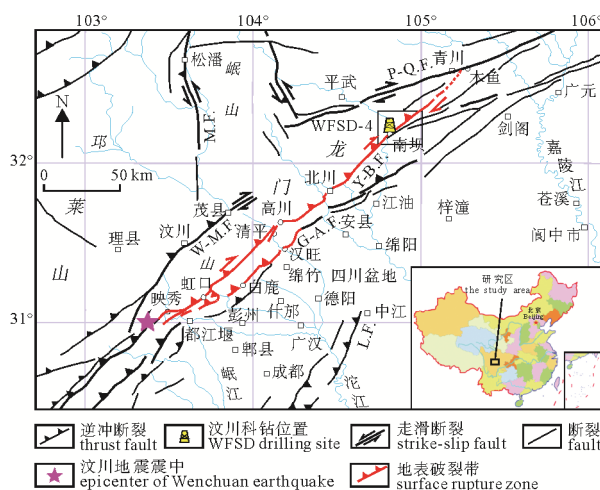


图 1 汶川地震断裂带科学钻探工程 4 号孔(WFSD-4)位置(Li et al., 2013)

Fig. 1 Location of Wenchuan earthquake Fault Scientific Drilling project (WFSD-4) (after Li et al., 2013)

用负压方法进行钻探泥浆脱气,随后,钻探泥浆气体经过抗压耐热管被引入到现场实验室进行仪器分析(唐力君等, 2006; 唐力君等, 2010)。WFSD-4 钻孔除了采用 OmniStar 型在线质谱仪,还采用 RAD-7 型在线测氦仪,在线同时检测钻探泥浆气体中 H_2 、 He 、 CH_4 和 Rn 等组分,这些仪器在野外恶劣条件下可长期、稳定地进行现场实时检测(Jorg et al., 2006; 唐力君等, 2010; Tang et al., 2013)。

2 钻孔中主要可采集样品

在钻探工程中,通常需要采集大量的岩心和岩屑,这些固体样品的采集也是科学钻探工程的主要目的和最主要研究对象。但是在特殊井段中,由于不需要全孔取心,或者容易出现岩心缺失和岩屑无法循环到地面等状况,从而导致无法采集到对应深度的岩心、岩屑等固体样品的情况,而气体样品、泥浆样品在钻探过程中容易循环到地面,易于保证样品采集和研究的连续性(罗立强等, 2004a, b; 唐力君等, 2006, 2011; Tang et al., 2014),为研究钻孔不同深度的地球化学变化提供不可再现的样品信息。

2.1 钻探泥浆气体样品

钻探泥浆脱气过程是在地面对含有钻孔底部流体的钻探循环泥浆进行气液分离。通过改造钻探循环泥浆管路,特别是在最靠近钻孔循环泥浆出口的改造,并通过泥浆搅拌装置且采用微负压办法,可实现钻探循环泥浆的气液分离,从而采集来自钻探循环泥浆携带出来的钻孔地下深部的气体样品(罗立强等 2004b; Jorg et al., 2006; 唐力君等, 2006)。

2.2 可采集泥浆样品

钻探过程中使用的钻探泥浆通过钻杆内外的空间进行循环,不断在孔底和地面进行交换,同时把钻探过程中的钻孔底部的岩屑、流体等携带至地面。因此钻探泥浆与钻孔底部流体不可避免会产生反应和接触融合,从而在钻探泥浆的气体 and 液体中保留有相关钻孔底部信息。研究人员通过采集循环到地面的含有钻孔底部信息的岩屑、流体等的钻探泥浆,对其进行深入分析和研究将可能获得钻孔不同深部特征(张伟等, 2012; Li et al., 2013), 如对钻孔中岩屑的观察,可初步确定钻孔对应深度的岩石类型。

3 现场分析和场外分析

汶川科钻的随钻实时流体分析全程检测钻探过程中的 Ar、CH₄、H₂ 等多种流体组分,为探讨地下流体与地震前兆关系提供基础资料(许志琴等, 2008; 唐力君等, 2013; Tang et al., 2014)。通过场内和场外分析数据对比研究,特别是在全面钻进阶段,即不取岩心的钻进过程中,随钻流体实时分析的重要性以及所采集样品的不可再现性均得到进一步体现,为地震等地学研究提供来自地下深部的直接数据(曾令森等, 2005; 孙青等, 2005; 王焕等, 2010; Tang et al., 2014)。

3.1 场内流体实时分析

钻探泥浆经过气液分离后,钻探泥浆气体通过抗压耐热管引入到现场实时分析实验室进行场内分析,目前主要是通过气体质谱仪和测氦仪进行实时分析,包括使用气体质谱仪场内实时分析钻探泥浆气体中 H₂、He、CH₄、CO₂、N₂、O₂、Ar 和使用测氦仪场内实时分析 Rn(罗立强等 2004b; Jorg et al., 2006; 唐力君等, 2006, 2010)。

钻探泥浆气体分析一方面是由气体属性决定,另一方面也是钻探工程需要,现场流体实时分析结果可为钻探工程提供直接,甚至是决策性的数据支撑(Luo et al., 2004; 罗立强等, 2004a, b; Jorg et al., 2006)。例如,在易出现易燃气体组分的井段中,需要及时提醒采取特别措施保证现场用电、用火安全,而且现场流体实时分析实验室也曾经检测到高含量甲烷,其浓度已超过气体可燃限。

3.2 场外泥浆汞分析

场外分析主要是利用 DMA-80 测汞仪测定所采集钻探泥浆样品中的汞,包括泥浆滤液中的汞和泥浆固体中的汞。首先将泥浆样品过滤,吸取 0.100 ml 的滤液放入测汞仪自动进样器中,测出滤液中的汞的含量。将过滤出的泥浆取部分放入蒸发皿中,在控温 100 度电热板上蒸干(晾干),将干泥块捣碎称

取 0.1 g 放入自动进样器中测其汞的含量(范凡, 2003)。

4 流体地球化学特征和岩性对应关系

4.1 钻探流体多组分地球化学特征

在 WFSD-4 钻孔的 1600~2200 m 的钻进期间,特别是在 2012 年 12 月,钻孔附近发生了 M_s3.0 级以上的余震 7 次,其中在 12 月 1、13 日发生了两次 M_s4.0 级的余震,是余震高发的月份,另外,钻探工程、流体变化出现了许多不同于其他钻孔的变化,需要进一步区别和分类随钻流体组分,探讨钻探过程中地下流体组分的变化规律,更好利用流体分析数据,并利用实时和场外检测数据判断钻探过程中不同井段对应的随钻流体,厘定地下流体在钻孔中可能的侵入区域(Thomas et al., 2007, 2008; 刘舒波等, 2012; 唐力君等, 2013; Tang et al., 2014)。

对该井段中的泥浆样品的分析结果如表 1,泥浆液体中测量的汞的最大值为 0.66 μg/L,对应的井深为 1746.96 m,最小值为 0.33 μg/L,对应的井深分别为 1903.02 m, 1962.92 m, 1976.14 m, 平均值为

表 1 钻探泥浆中汞的测量值
Table 1 Measured values of mercury in drilling mud

序号	井深/m	日期	泥浆液体 Hg/(μg/L)	泥浆固体 Hg/(ng/g)
1	1687.18	2012-12-14	0.34	238
2	1699.29	2012-12-14	0.34	249
3	1711.53	2012-12-15	0.34	228
4	1715.54	2012-12-15	0.34	240
5	1717.50	2012-12-15	0.30	257
6	1726.89	2012-12-16	0.58	250
7	1732.60	2012-12-16	0.45	244
8	1742.90	2012-12-17	0.38	234
9	1746.96	2012-12-18	0.66	292
10	1750.23	2012-12-18	0.28	292
11	1752.20	2012-12-18	0.34	272
12	1762.45	2012-12-19	0.34	239
13	1768.69	2012-12-19	0.30	385
14	1777.62	2012-12-20	0.28	261
15	1784.01	2012-12-21	0.40	243
16	1789.63	2012-12-21	0.34	239
17	1803.43	2012-12-22	0.25	294
18	1818.34	2012-12-23	0.28	256
19	1833.00	2012-12-24	0.25	289
20	1839.05	2012-12-24	0.28	247
21	1853.20	2012-12-25	0.34	269
22	1860.00	2012-12-25	0.34	257
23	1872.70	2012-12-26	0.30	325
24	1878.80	2012-12-26	0.30	248
25	1903.02	2012-12-29	0.23	258
26	1917.58	2012-12-30	0.25	239
27	1962.92	2013-1-2	0.23	312
28	1976.14	2013-1-4	0.23	291

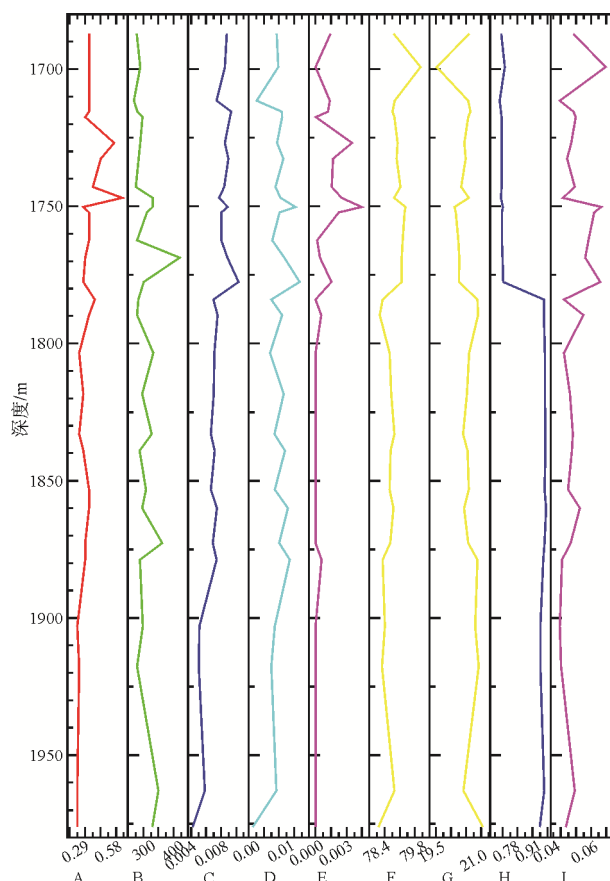


图 2 钻探泥浆中多种组分剖面

Fig. 2 Multi-components profile in drilling mud

A-泥浆液体中的汞测量值($\mu\text{g/L}$); B-泥浆固体中的汞测量值(ng/g); C-泥浆气体中的氢($\% \text{ v/v}$); D-泥浆气体中的氦($\% \text{ v/v}$); E-泥浆气体中的甲烷($\% \text{ v/v}$); F-泥浆气体中的氮($\% \text{ v/v}$); G-泥浆气体中的氧($\% \text{ v/v}$); H-泥浆气体中的氩($\% \text{ v/v}$); I-泥浆气体中的二氧化碳($\% \text{ v/v}$)

A-measured values of mercury in the liquid part of drilling mud($\mu\text{g/L}$); B-measured values of mercury in the solid part of drilling mud(ng/g); C-measured values of hydrogen in the drilling mud gas($\% \text{ v/v}$); D-measured values of helium in the drilling mud gas($\% \text{ v/v}$); E-measured values of methane in the drilling mud gas($\% \text{ v/v}$); F-measured values of nitrogen in the drilling mud gas($\% \text{ v/v}$); G-measured values of oxygen in the drilling mud gas($\% \text{ v/v}$); H-measured values of argon in the drilling mud gas($\% \text{ v/v}$); I-measured values of carbon dioxide in the drilling mud gas($\% \text{ v/v}$)

$0.33 \mu\text{g/L}$, 有 9 个样品的测量值近似平均值, 最大值是最小值的两倍, 表明泥浆液体中的汞含量的区别明显。泥浆固体中测量的汞的最大值为 385 ng/g , 对应的井深为 1768.69 m , 最小值为 228 ng/g , 对应的井深为 1711.53 m , 平均值为 273 ng/g , 最大值为最小值的 1.69 倍, 小于液体中的汞。

通过把场内的钻探现场流体实时分析和场外的钻探泥浆中汞的测定结果, 按照表 1 的钻孔深度以及所对应井段的流体实时分析获得的多组分浓度进行作图, 如图 2 所示, 多组分浓度与表 1 的井深一一对应。泥浆气体组分测定采用归一化处理, 是一种相对量, 其中氢的最大值为平均值的 1.37 倍, 氮、甲烷、氮、氧、氩和二氧化碳分别为 1.72、5.34、

1.02、1.03、1.12 和 1.29 倍。总体上看, 泥浆气体中含量高的组分出现异常变化的幅度较小, 进一步说明了氮、氧和氩作为异常识别组分的难度, 氢、氮和甲烷作为含量低的组分, 较易受到地下异常信息的影响, 从而较易获得地下异常信息。氢和氮的最大值对应的井深均为 1777.72 m , 甲烷的最大值对应的井深为 1750.23 m , 略滞后于泥浆液体中的汞; 氢和氮的最小值对应的井深均为 1976.14 m , 与泥浆液体中的汞相同, 呈现出泥浆气体和液体的一致性。

由图 2 可看出, 在钻孔井深大约为 1750 m 和 1780 m 左右, 多种组分有突变的趋势, 特别是在 1750 m , 泥浆气体、液体和固体中均出现较为明显的突变峰值, 表明在该深度井段中, 钻孔深部突然快速侵入大量地下流体, 其中泥浆液体中的汞, 泥浆气体中的甲烷、二氧化碳均为最高值正异常变化, 且泥浆液体中仅在该处出现明显的异常变化。在 1780 m 处, 多种组分出现跳跃式的变化, 泥浆固体中的汞出现最高值正异常变化, 同时泥浆液体中的汞在较深井段再次出现正值异常变化, 可以推断汞的变化是由固体引起, 液体中的汞是由钻孔固体逐渐释放到泥浆液体中的。另外, 泥浆气体中的氢、氮、甲烷也出现正值异常变化, 氮和二氧化碳出现高负值异常变化, 氧和氩为高正值异常变化。另外, 在 1880 m 处, 多种组分也有明显的同时异常变化, 包括泥浆固体中的汞。

4.2 流体组分与岩性对应关系

WFSD-4 钻孔根据地学研究需要和钻探工程设计要求, 在 $1550 \sim 1893 \text{ m}$ 期间, 采取不取心的全面钻进, 但在钻探泥浆循环过程中, 按照每隔 1 m 收集 1 kg 岩屑, 做岩屑编录和化学分析(王焕等, 2010; 张伟等, 2012; Li et al., 2013, 2014)。采集的岩屑中, 其中在 $1550 \sim 1893 \text{ m}$ 之间的岩性主要为变(细)砂岩、板岩和炭质板岩为主。采集的岩心中, 在 $1980.00 \sim 2315.72 \text{ m}$ 之间的岩性主要由变(细)砂岩、碳质板岩组成, 夹有长英质脉、断层角砾岩、碎裂岩和断层泥等。

具体的钻孔岩心岩性见图 3。变质砂岩中的裂隙较为发育; 碳质板岩、板岩板状劈理非常发育, 岩心极为破碎; 断层角砾岩组成为角砾及基质二部分, 角砾成分为含碳质板岩、方解石及石英等, 呈棱角-次棱角状, 基质为泥质及磨碎的岩粉, 断层角砾岩主要原岩为碳质板岩; 断层泥为泥质, 含量约 70% , 多为条带状, 每条带厚度约为 $0.02 \sim 0.10 \text{ m}$ 。

为更精细地区分深部流体地球化学特征, 流体各组分按照每半米一个测量数据进行作图, 如图 4。

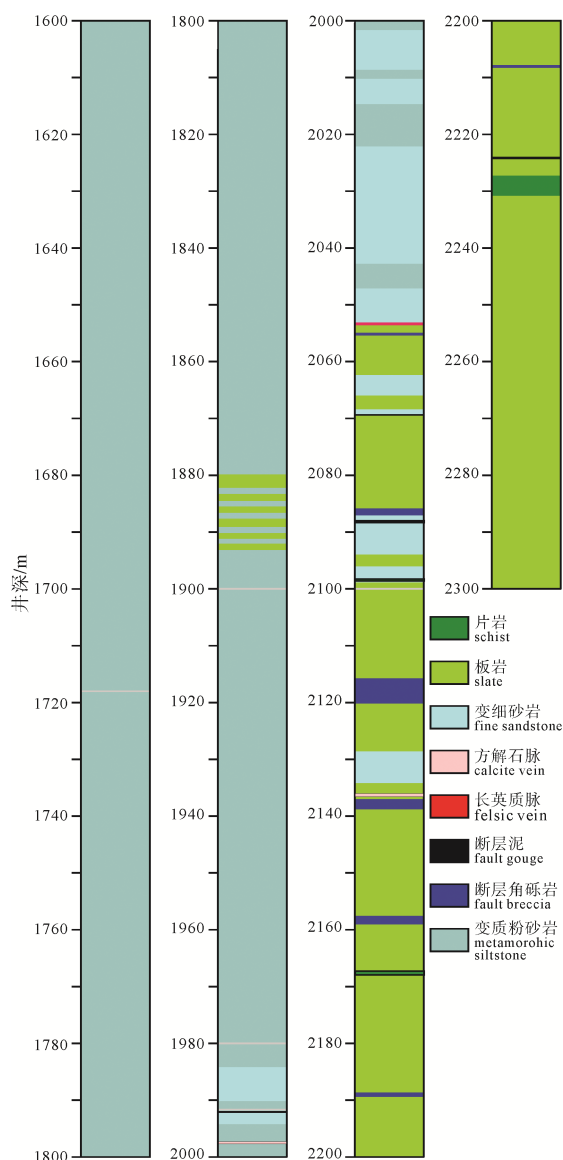


图3 WFSD-4号孔1600~2300 m岩心岩性
(李海兵等, 2014)

Fig. 3 Lithology of 1600-2300m drilling core in WFSD-4
(after LI et al., 2014)

从岩性剖面和流体各组分剖面对比可看出, 在岩心1880~1895 m间出现板岩和砂岩的交错带, 同时引起了流体的多组分变化, 特别是泥浆气体中的组分变化。

在1980 m处, 钻探泥浆气体在钻孔岩心出现变质砂岩时, 多个组分出现明显的异常变化, 类似异常变化也在2050 m处出现, 均为同样岩性引起, 只是变化幅度较低, 这应该是变质砂岩裂隙较为发育, 岩性比较完整, 从而在这段岩心中气体容易储存、迁移的结果。另外, 在2060 m之后, 出现断续的断层角砾岩, 钻探泥浆气体中的甲烷也是断续上升, 这跟断层角砾岩中主要原岩为炭质板岩相关。还有, 在1600~1980 m期间, 甲烷、氦等多个组分浓度, 随着钻孔井深有明显的波动变化, 但该段的岩性变化不大, 因此这些钻探泥浆气体的波动变化

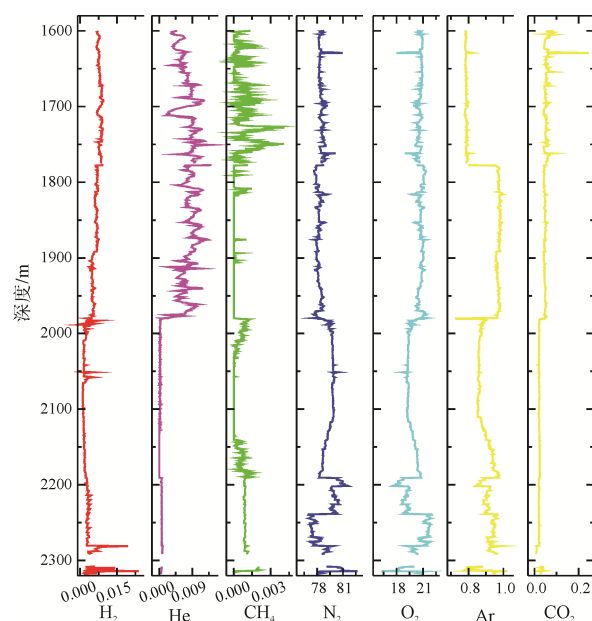


图4 WFSD-4号孔1600~2300 m流体剖面

Fig. 4 Fluid profile of 1600~2300 m in WFSD-4

横坐标为钻探泥浆气体中各种组分的浓度, 浓度值的间隔为每半米一个值(% v/v), 纵坐标为钻孔深度(m)

The horizontal axis represents the concentrations of various components in drilling mud gas, the value interval is every half meters (% v/v), the vertical axis represents the drilling depth in WFSD-4 (m)

与岩心岩性的相关性较弱(Tang et al., 2013, 2014), 而此期间, 恰好是钻孔附近区域的余震多发时间, 流体与余震的相关性较强, 更有可能探讨钻探流体变化与余震等构造活动的相关程度, 获得余震前兆流体变化特征。

5 结论

钻探过程中不断在地表和钻孔深部循环的泥浆, 也在不断地与钻孔地下深部产生反应及接触、融合和交换, 同时把钻孔底部的岩屑、流体等地下物质和信息携带至地面, 为地面研究人员提供了来自钻孔地下深部的研究对象和研究数据。

通过钻探现场的场内分析和场外分析, 获得钻探泥浆的多种组分深部剖面, 其中包括钻探泥浆中液体汞和固体汞的剖面。

对比钻探泥浆中多种组分剖面, 获得钻探不同深部组分变化特征, 在特定深度的钻孔中, 不仅气体, 而且在液体、固体中, 都保存有钻孔地下深部的流体组分, 而且出现了明显的突变特点, 为厘定地下流体侵入区间提供多种样品数据支持, 印证了现场流体分析的重要性。

在钻孔岩性的变化中, 不同岩性的交错变化容易引起钻探泥浆气体的变化, 特别是钻探泥浆气体中的多组分变化。在钻孔岩性裂隙较为丰富的井段, 是钻探泥浆气体变化幅度较大的区间, 特别是容易

引起钻探泥浆气体中的甲烷上升。

钻探泥浆气体、液体中的多组分变化受到影响因素较多,通过比较、排除与岩性的相关性较弱的钻探泥浆气体的波动变化,可以推测钻探流体与余震的相关性较强,这恰好是钻孔附近区域的余震多发期。

致谢: 非常感谢中国地质科学院国家地质实验测试中心罗立强研究员、孙青研究员、詹秀春研究员对钻探流体现场分析和研究工作的长期大力支持和可行性建议,在此深表谢意!感谢中国地质科学院国家地质实验测试中心汶川科钻工作人员孙建伶、袁静、储彬彬等的野外艰苦工作。感谢汶川科钻地学部现场实验室黄尧、孙立文和工程部在野外分析的帮助和建设性意见。感谢国家科技重大专项:汶川地震断裂带科学钻探工程的第八课题:地下流体异常和地震前兆关系和第三课题之第四专题:井口气体、流体地球化学监测的经费支持。感谢审稿人的仔细审阅。

参考文献:

- 车用太,刘成龙,鱼金子,官致君,李军. 2008. 汶川 Ms8.0 地震的地下流体与宏观异常及地震预测问题的思考[J]. 地震地质, 30(4): 828-838.
- 董树文,许志琴,吴珍汉. 2009. 中国地质科学院对 5.12 汶川地震的快速反应与调查研究[J]. 地球学报, 30(1): 21-26.
- 董树文,张岳桥,龙长兴,吴珍汉,安美建,张永双,杨农,陈正乐,雷伟志,施炜,石菊松. 2008. 四川汶川 Ms 8.0 地震地表破裂构造初步调查与发震背景分析[J]. 地球学报, 29(3): 392-396.
- 范凡. 2003. 微波消解—原子荧光光谱法测定汞[J]. 岩矿测试, 22(1): 58-60.
- 李海兵,黄尧. 2014. 汶川地震断裂带科学钻探工程地学部资料[R]. 成都: 汶川地震断裂带科学钻探工程中心.
- 李民. 2007. 地下流体对地震前兆作用的综述[J]. 华北地震科学, 25(2): 24-28.
- 刘舒波,唐力君,孙青,岑况. 2012. 汶川地震断裂带科学钻探工程 2 号孔 350~800m 井段的钻探泥浆气体组分变化[J]. 物探与化探, 36(1): 48-53.
- 罗立强,孙青,詹秀春. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 0~2000 米流体剖面及流体地球化学研究[J]. 岩石学报, 20(1): 185-191.
- 罗立强,王健,李松,张月琴,张保科,李迎春,唐力君,詹秀春. 2004. 中国大陆科学钻探现场分析与地下流体异常识别[J]. 岩矿测试, 23(2): 81-86.
- 孙青,李圣强,罗立强. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔地下流体特征及与地震活动的关系初步研究[J]. 地震, 25(1): 15-21.
- 唐力君,李迎春,王健,张保科,李松. 2006. 中国大陆科学钻探工程现场实验室采样及样品处理方法探讨[J]. 中国地质, 33(5): 1174-1179.
- 唐力君,王广,王健,王晓春,刘舒波,聂武. 2013. 汶川地震断裂带科学钻探工程一号孔主断层的随钻流体响应特征[J]. 地球学报, 34(1): 95-102.
- 唐力君,王健,王晓春,李迎春,王广,樊兴涛,闵谦. 2010. 汶川地震科学钻探实时流体分析仪器及应用[J]. 分析仪器, (2): 11-16.

- 唐力君,王晓春,王健,李迎春,王广. 2011. 科学钻探工程中的随钻实时流体分析[J]. 岩矿测试, 30(5): 637-643.
- 王焕,李海兵,裴军令,李天福,黄尧,赵志丹. 2010. 汶川地震断裂带结构、岩性特征及其与地震活动的关系[J]. 第四纪研究, 30(4): 768-778.
- 魏乐军,郭坚峰,蔡慧,李海兵,强祖基. 2008. 卫星热红外异常——四川汶川 Ms8.0 级大地震的短临震兆[J]. 地球学报, 29(5): 583-591.
- 许志琴,李海兵,吴忠良. 2008. 汶川地震和科学钻探[J]. 地质学报, 82(12): 1613-1622.
- 许志琴,杨经绥,张泽明,刘福来,杨文采,金振民,王汝成,罗立强,黄力,董海良. 2005. 中国大陆科学钻探终孔及研究进展[J]. 中国地质, 32(2): 177-183.
- 曾令森,许志琴,罗立强,詹秀春,梁凤华,杨经绥,李海兵. 2005. CCSD 在线流体监测捕获的气体地球化学异常与 2004 年 9.3 级苏门答腊地震可能的超远程关系[J]. 岩石学报, 21(5): 521-524.
- 张伟,李海兵,黄尧,司家亮,刘栋梁,李勇,王焕,杨光,孙立文. 2012. 四川汶川地震断裂带科学钻探 2 号孔(WFSD-2)岩性特征和断裂带的结构[J]. 地质通报, 31(8): 1201-1218.
- 张泽明. 1998. 德国大陆科学钻探的地壳流体研究[J]. 地质科技情报, 17(2): 7-12.
- 周晓成,杜建国,陈志,崔月菊,刘雷. 2012. 地震地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(4): 340-346.

References:

- CHE Yong-tai, LIU Cheng-long, YU Jin-zi, GUAN Zhi-jun, LI Jun. 2008. Underground fluid anomaly and macro anomaly of MS8.0 Wenchuan earthquake and opinions about earthquake prediction[J]. Seismology and Geology, 30(4): 828-838(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, XU Zhi-qin, WU Han-zhen. 2009. CAGS quick response to and geoscientific survey on May 12 Wenchuan earthquake[J]. Acta Geoscientia Sinica, 30(1): 21-26(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, ZHANG Yue-qiao, LONG Chang-xing, WU Zhen-han, AN Mei-jian, ZHANG Yong-shuang, YANG Nong, CHEN Zheng-le, LEI Wei-zhi, SHI Wei, SHI Ju-song. 2008. Surface rupture investigation of the Wenchuan Ms 8.0 earthquake of May 12th, west Sichuan, and analysis of its occurrence setting[J]. Acta Geoscientia Sinica, 29(3): 392-396(in Chinese with English abstract).
- FAN Fan. 2003. Determination of Hg in animal tissues by AFS with microwave sample digestion[J]. Rock and Mineral Analysis, 22(1): 58-60(in Chinese with English abstract).
- JORG E, STÖBER I. 2005. Introduction to Special Issue: long-term fluid production in the KTB pilot hole, Germany[J]. Geofluids, 5: 1-7.
- JORG E, THOMAS W, MARTIN Z. 2006. Real-time mud gas logging and sampling during drilling[J]. Geofluid, 6: 225-233.
- LI Hai-bing, HUANG Yao. 2014. Document of geological department of Wenchuan Earthquake fault Scientific Drilling Project[R]. Chengdu: The engineering center of Wenchuan earthquake Fault Scientific Drilling Project(in Chinese).
- LI Hai-bing, WANG Huan, XU Zhi-qin, SI Jia-liang, PEI Jun-ling, LI Tian-fu, HUANG Yao, SONG Sheng-rong, KUO Li-wei,

- SUN Zhi-ming. 2013. Characteristics of the fault-related rocks, fault zones and the principal slip zone in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1)[J]. *Tectonophysics*, 584: 23-42.
- LI Hai-bing, XU Zhi-qin, NIU Yi-xiong, KONG Guang-sheng, HUANG Yao, WANG Huan, SI Jia-liang, SUN Zhi-ming, PEI Jun-ling, GONG Zheng, CHEVALIER M, LIU Dong-liang. 2014. Structural and physical property characterization in the Wenchuan earthquake Fault Scientific Drilling project - hole 1 (WFSD-1)[J]. *Tectonophysics*, 619-620: 86-100.
- LI Min. 2007. Overview on the action of subsurface fluid to seismic precursor[J]. *North China Earthquake Sciences*, 25(2): 24-28(in Chinese with English abstract).
- LIU Shu-bo, TANG Li-jun, SUN Qing, CEN Kuang. 2012. Variation of drilling mud gas components at 350~800 interval of No.2 borehole of scientific drilling for Wenchuan seismic faulted zone[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 36(1): 48-53(in Chinese with English abstract).
- LUO Li-qiang, SUN Qing, ZHAN Xiu-chun. 2004. 0~2000 m fluid profiles and sources in Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 185-191(in Chinese with English abstract).
- LUO Li-qiang, WANG Jian, LI Song, ZHANG Yue-qin, ZHANG Bao-ke, LI Ying-chun, TANG Li-jun, ZHAN Xiu-chun. 2004. On-line analysis of gases in Chinese Continental Science Drilling Project and identification of fluids from the earth crust[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 23(2): 81-86(in Chinese with English abstract).
- LUO Li-qiang, ZHAN Xiu-chun, SUN Qin. 2004. Fluid Geoanalysis in the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(2): 325-331.
- SUN Qing, LI Sheng-qiang, LUO LI-qiang. 2005. Geochemistry of some fluid compositions in the mud of CCSO main well and their relations to seismicity[J]. *Earthquake*, 25(1): 15-21(in Chinese with English abstract).
- TANG Li-jun, LI Ying-chun, WANG Jian, ZHANG Bao-ke, LI Song. 2006. Sampling and fluid sample treatment in the field lab of the Chinese Continental Scientific Drilling project[J]. *Geology in China*, 33(5): 1174-1179(in Chinese with English abstract).
- TANG Li-jun, LUO Li-qiang, LAO Chang-ling, WANG Guang, WANG Jian, HUANG Yao. 2014. Real time fluid analysis during drilling of the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project and its responding features[J]. *Tectonophysics*, (619-620): 70-78.
- TANG Li-jun, LUO Li-qiang, WANG Guang. 2013. Fluid analysis of WFSD project in China and the fluid change of WFSD-2[J]. *AGU Fall Meeting 2013*, T23E-2645.
- TANG Li-jun, WANG Guang, WANG Jian, WANG Xiao-chun, LIU Shu-bo, NIE Wu. 2013. Responding features of fluids during drilling of the main fracture zone in WFSD-1 Hole[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 95-102(in Chinese with English abstract).
- TANG Li-jun, WANG Jian, WANG Xiao-chun, LI Ying-chun, WANG Guang, FAN Xingtao, MIN Qu. 2010. Real-time fluid analysis instruments and their application in Wenchuan earthquake scientific drilling[J]. *Analytical Instrumentation*, 4(2): 11-16(in Chinese with English abstract).
- TANG Li-jun, WANG Xiao-chun, WANG Jian, LI Ying-chun, WANG Guang. 2011. Real-time fluid analysis in the scientific drilling project[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 30(5): 637-643(in Chinese with English abstract).
- THOMAS W, JORG E. 2007. A helium isotope cross-section study through the San Andreas Fault at seismo-genic depths[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8(1): doi:10.1029/2006GC001388.
- THOMAS W, JORG E. 2008. Origin and spatial distribution of gas at seismogenic depths of the San Andreas Fault from drill-mud gas analysis[J]. *Applied Geochemistry*, 23(6): 1675-1690.
- THOMAS W, JORG E. 2011. Chemical and isotope compositions of drilling mud gas from the San Andreas Fault Observatory at Depth (SAFOD) boreholes: Implications on gas migration and the permeability structure of the San Andreas Fault[J]. *Chemical Geology*, 284(1-2): 148-159.
- WANG Huan, LI Hai-bing, PEI Jun-ling, LI Tian-fu, HUANG Yao, ZHANG Zhi-dan. 2010. Structural and lithologic characteristics of the Wenchuan Earthquake Fault Zone and its relationship with seismic activity[J]. *Quaternary Sciences*, 30(4): 768-778(in Chinese with English abstract).
- WEI Le-jun, GUO Jian-feng, CAI Hui, LI Hai-bing, QIANG Zu-ji. 2008. Satellite thermal infrared anomaly: a short-term and impending earthquake precursor before the Wenchuan Ms8.0 earthquake in Sichuan, China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(5): 583-591(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, LI Hai-bing, WU Zhong-liang. 2008. Wenchuan earthquake and scientific drilling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 613-1622(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, YANG Jing-sui, ZHANG Ze-ming, LIU Fu-lai, YANG Wen-cai, JIN Zhen-min, WANG Ru-cheng, LUO Li-qiang, HUANG Li, DONG Hai-liang. 2005. Completion and achievement of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project[J]. *Chinese Geology*, 32(2): 177-183(in Chinese with English abstract).
- ZENG Ling-sen, XU Zhi-qin, LUO Li-qiang, ZHAN Xiu-chun, LIANG Feng-hua, YANG Jing-sui, LI Hai-bing. 2005. 2004 Mw 9.3 Sumatra-Andaman earthquake and gas geochemistry anomalies in CCSD borehole: A possible ultra-remote linkage[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 521-524(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wei, LI Hai-bing, HUANG Yao, SI Jia-liang, LIU Dong-liang, LI Yong, WANG Huan, YANG Guang, SUN Li-wen. 2012. Lithologic characteristics and fault zone structure revealed by No.2 hole cores of Wenchuan Earthquake Fault Zone Scientific Drilling(WFSD-2)[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1201-1218(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ze-ming. 1998. Study of crustal fluid in the german continental scientific deep drilling program[J]. *Geological Science and Technology Information*, 17(2): 7-12(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xiao-cheng, DU Jian-guo, CHEN Zhi, CUI Yue-ju, LIU Lei. 2012. Advance review of seismic geochemistry[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(4): 340-346 (in Chinese with English abstract).