

汶川地震断裂带科学钻探工程2号孔 350~800 m井段的钻探泥浆气体组分变化

刘舒波^{1,2}, 唐力君², 孙青², 岑况¹

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 以汶川地震断裂带科学钻探工程(WFSD)2号孔350~800 m井段的钻探泥浆中某些气体组分测定数据, 以及2009-10-10~2010-05-24钻孔附近断裂带范围内里氏震级 $M_L \geq 3.5$ 的目录、断裂带岩芯岩性为基础, 探讨钻探泥浆脱气气体组分异常与构造环境、地震活动的关系。研究表明, 660~680 m井段附近岩石破碎程度达到最大, 各气体归一值也出现明显的正、负异常, 得到的最大、最小值所对应的井段也是面波震级 M_s 3.0以上余震的频发处, 气体异常多数出现在岩石的裂隙、破裂面、断层处。

关键词: 汶川地震断裂带; 科学钻探工程; 流体分析; 气体组分异常

中图分类号: P632, P65

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2012)01-0048-06

地下流体在地震孕育、发生前后伴有地下气体异常已为众多震例所证实^[1], 其中一些气体的地球化学异常可能与本地中小地震及远强震有关^[2-3]。在古代, 中国百姓通过井水水位异常、冒水泡或气体等现象预测地震。井水冒泡现象是由于地震前岩石受挤压变形, 隐藏在岩石裂隙中的气体被挤压排出, 沿地下水通道进入水中造成的^[4-5]。

汶川地震发生在青藏高原边缘的龙门山断裂带上, 该断裂带是中国最重要、最活跃的地震活动带。2008-05-12发生8.0级主震后, 余震不断。汶川地震断裂带科学钻探工程2号孔(WFSD-2)在现场采

用气体质谱仪对泥浆钻探气体组分进行实时定量收集与分析, 对各组分的变化作出判断和解释, 掌握第一手准确、可靠的地学信息^[6-10]。笔者分析了钻探期间采集的气体组分浓度数据, 探讨钻探泥浆气体组分浓度变化与钻孔岩芯裂隙、余震的关系。

1 断裂带地质背景

汶川地震发生在青藏高原东南边缘, 川西龙门山中心。龙门山位于四川盆地西缘, 呈北东—南西向延伸, 山势险要, 地质构造复杂^[11]。龙门山系在区域上构成龙门山逆冲断裂带(图1), 其中有3条

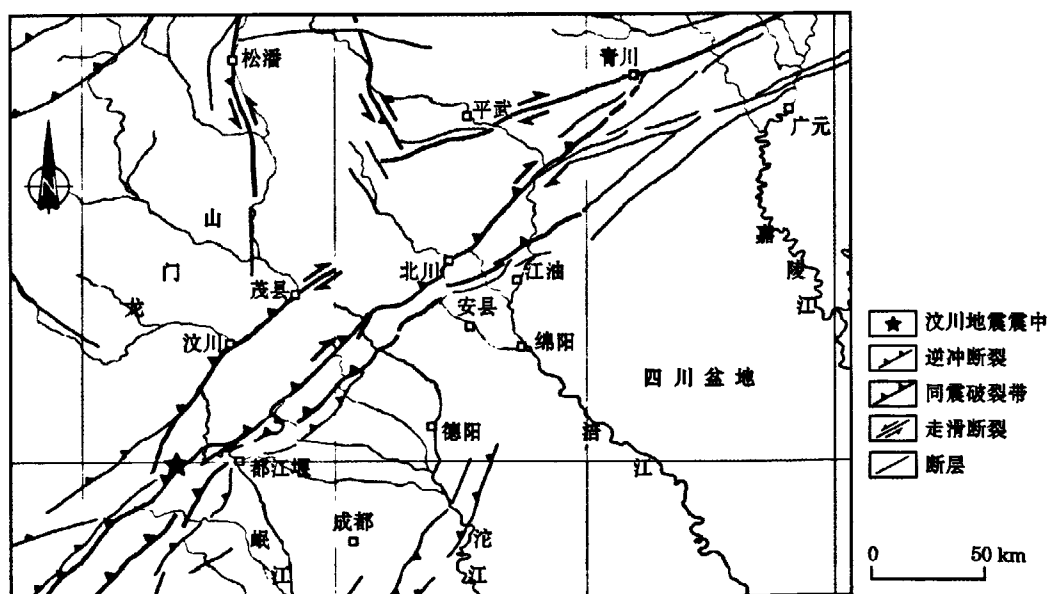


图1 龙门山断裂带分布^[16]

最主要的大断裂,自东向西依次为龙门山主边界断裂(都江堰—安县断裂)、龙门山主中央断裂(北川—映秀断裂)和龙门山后山断裂(汶川—青川断裂)^[12-13]。龙门山断裂带附近地震活动频度低,强度不大,历史上最大地震震级为 6.2 级,地震呈 NE 向分布,与龙门山断裂带走向一致^[14]。从大陆尺度上看,中亚和东亚的地震活动是由于印度洋板块冲撞欧亚板块造成的,印度洋板块向北运动,挤压欧亚板块,造成了青藏高原的隆升^[15]。

2 WFSD 工作方法

WFSD 项目采用一系列先进的观测和分析手段,通过对大地震源区进行直接取样,分析、测试和研究岩芯、岩屑和流(气)体样品,揭示汶川地震断裂带的深部物质组成、结构和构造属性,恢复地震过程中岩石的物理化学行为、能量状态和破裂演化过程,深入认识汶川地震发生的应力环境、地下流体在地震过程中的作用和地震断裂带的发展机理,为未来地震的监测、预报或预警提供最基本的数据^[16]。

3 气体现象采集与分析

对携带有地球深部流体信息的 WFSD-2 钻探泥浆进行脱气处理,处理后的气体通过大气平衡仪调压、流量计流速控制和真空泵驱动后,经过抗压耐热管引入到现场实验室进行冷冻干燥法除湿,再用气体质谱仪对钻探泥浆中的 Ar、O₂、CO₂、H₂、CH₄、He 等脱气气体进行实时分析,收集异常气体,以便作进一步的研究^[17-19]。

4 结果与讨论

4.1 钻探泥浆气体归一值的变化特征

4.1.1 垂向变化

将钻探泥浆气体 He、N₂、Ar 浓度数据作归一化处理,弱化影响气体异常规律的数值,并与钻孔岩芯破碎程度进行对比(图 2)。可以看出,钻探泥浆气体具有较明显的高值和低值异常,且浓度异常地段与岩芯破碎程度较强部位基本一致,推测钻探泥浆气体异常可能与钻孔岩芯破碎程度存在一定关系。

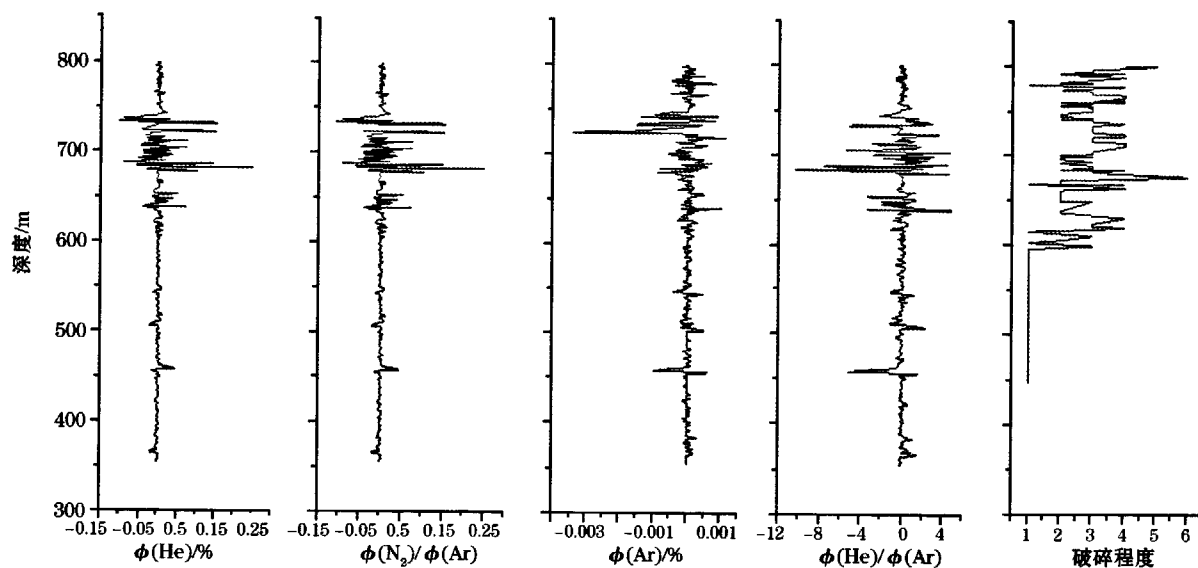


图 2 钻探泥浆气体浓度与岩芯破碎程度的关系

4.1.2 岩芯破碎程度的对应规律

观测 WFSD-2 号孔 600~800 m 井段岩芯的岩性,在 600~630 m 井深范围内,多见断层破碎带、碳质泥砂岩、长石岩屑砂岩、碎裂岩,岩石破碎程度开始变化, $\phi_{\text{He}}/\phi_{\text{Ar}}$ 、 $\phi_{\text{N}_2}/\phi_{\text{Ar}}$ 、 $\phi_{\text{Ar}}/\phi_{\text{He}}$ 的归一值开始出现正、负值异常,但异常并不明显,余震次数也开始增加;在 630~740 m 井深范围内,岩性多为碎裂岩、断层岩、断层角砾岩、炭质页岩、炭质粉砂岩、长石岩屑砂岩,随着岩石破碎程度的不断加强,各气体归一值也出现比较明显的正、负值异常,且此段范围内余

震频发,在 660~680 m 井段附近破碎程度曾达到最强;在 740~800 m 井段范围内,岩性多为长石岩屑砂岩、炭质页岩、断层角砾岩,岩石破碎程度依然强烈, $\phi_{\text{He}}/\phi_{\text{Ar}}$ 、 $\phi_{\text{N}_2}/\phi_{\text{Ar}}$ 、 $\phi_{\text{Ar}}/\phi_{\text{He}}$ 归一值趋缓, ϕ_{Ar} 归一值有小幅度异常,余震次数相对于 630~740 m 井段处有所减少。

余震发生时,伴随着岩石破碎和断裂带的形成,产生了流体通道,使泥浆脱气气体发生运移,导致地下流体异常,因此推测构造环境可能与地下流体异常有一定的联系(表 1)。

表 1 WFSD-2 号孔 600 ~ 800 m 井段的岩芯岩性

井深/m	岩性	M_s 2.0 ~ 2.9	M_s 3.0 ~ 3.9	M_s 4.0 ~ 4.9
599.99 ~ 606.08	断层破碎带	79	4	0
606.08 ~ 619.60	长石岩屑砂岩、碳质泥砂岩	11	1	0
619.60 ~ 620.55	断层破碎带	2	1	0
620.55 ~ 630.75	碎裂岩、碳质泥砂岩、长石岩屑砂岩	16	2	0
630.75 ~ 697.46	炭质页岩、炭质粉砂岩、长石岩屑砂岩	272	81	2
697.46 ~ 728.93	碎裂岩、断层泥、断层角砾岩	34	4	0
728.93 ~ 740.42	炭质页岩、碎裂岩、炭质粉砂岩、断层角砾岩	29	7	1
740.42 ~ 754.71	长石岩屑砂岩、炭质页岩、断层角砾岩	22	2	0
754.71 ~ 761.50	长石岩屑砂岩、碎裂岩、炭质粉砂岩	10	1	0
761.50 ~ 767.34	断层角砾岩	4	0	0
767.34 ~ 780.76	长石岩屑砂岩、炭质页岩、断层角砾岩	25	4	0
780.76 ~ 799.69	断层泥、碎裂岩、炭质粉砂岩	87	7	1

注: M_s 为面波震级。

4.1.3 与余震的关系

在 WFSD-2 号孔附近发生了 4 次较大的余震, 即 2010-04-27 四川省汶川县 M_s 4.0 余震, 距离 WFSD-2 孔 24.7 km; 2010-04-28 四川省青川县 M_s 4.3 余震, 距离 WFSD-2 孔 202.6 km; 2010-04-29 四川省北川县 M_s 4.0 余震, 距离 WFSD-2 孔 90.4 km; 2010-05-15 四川省茂县 M_s 4.1 余震, 距离 WFSD-2 孔 83.5 km。这 4 次余震前后, He、 N_2 、Ar 含量和 $\varphi_{He}/\varphi_{Ar}$ 比值具有比较明显的异常现象, 说明 WFSD-2 的钻探泥浆气体中的 He、 N_2 、Ar 可能是记录地震的敏感载体^[9]。

在 600 ~ 630 m 井深处, φ_{He} 、 $\varphi_{N_2}/\varphi_{Ar}$ 、 φ_{Ar} 、 $\varphi_{He}/\varphi_{Ar}$ 变化不太明显, 岩石破碎程度开始加强, 该井段处发生过 118 次 $M_s \geq 2.0$ 的地震, 8 次 $M_s \geq 3.0$ 的地震; 在 630 ~ 800 m 井深处, φ_{He} 、 $\varphi_{N_2}/\varphi_{Ar}$ 有比较明显的正值异常, φ_{Ar} 、 $\varphi_{He}/\varphi_{Ar}$ 有比较明显的负值异常, 岩石破碎程度最为强烈, 并且在 676 m 井深处达到了最大, 该井深范围内共发生余震 593 次, 其中 483 次 $M_s \geq 2.0$ 的地震, 106 次 $M_s \geq 3.0$ 的地震, 4 次 $M_s \geq 4.0$ 的地震(表 2、3)。

表 2 WFSD-2 号孔井深与地震对应关系

井深/m	震级	地点	震级	地点
600 ~ 630	3.1	北川	3.0	平武
	3.4	汶川	3.3	彭州
	3.4	北川	3.3	绵竹
	3.3	青川	3.2	平武
630 ~ 680	4.0	汶川	4.0	北川
	4.1	茂县	4.3	青川

表 3 WFSD-2 号孔 600 ~ 800 m 泥浆脱气气体归一化统计

井深/m	归一化值	$\varphi_{He}/\%$	$\varphi_{Ar}/\%$	$\varphi_{N_2}/\varphi_{Ar}$	$\varphi_{He}/\varphi_{Ar}$
600 ~ 630	最大值	0.014274	0.1427	0.3936	0.0002
	最小值	-0.007358	-0.00736	-1.2051	-0.0002
630 ~ 680	最大值	0.2472	0.2474	4.4212	0.0011
	最小值	-0.1067	-0.10675	-7.590	-0.0034

4.2 钻探泥浆气体日平均值变化特征

4.2.1 钻探泥浆气体日平均值变化

为了进一步探寻 WFSD-2 孔钻探泥浆脱气气体浓度与地震的关系, 以及尽可能地消除某些异常点(某个时间点的不确定测量值)对整个流体变化规律的影响, 笔者对钻探泥浆脱气气体浓度数据进行日均值处理, 既可以抑制单点跳突异常, 又不至于影响真正的流体异常^[10]。

选取 2009-10-10 ~ 2010-05-24 时间段内 WFSD-2 号孔中钻探泥浆脱气气体浓度数据为研究对象(图 3), 从图中可以看出, φ_{CH_4} 、 φ_{He} 、 φ_{N_2} 、 φ_{CO_2} 、 $\varphi_{N_2}/\varphi_{O_2}$ 、 $\varphi_{He}/\varphi_{Ar}$ 、 $\varphi_{N_2}/\varphi_{Ar}$ 、 φ_{H_2} 、 φ_{Ar} 的日平均值均呈现出不同程度的异常。2009-10-12 ~ 2010-01-18, 各气体浓度均有不明显的异常; 2010-01-19 ~ 2010-03-24, 仪器故障, 气体没有监测; 2010-03-25 ~ 2010-05-23, 各气体均呈明显的异常。

4.2.2 钻探泥浆气体日平均值与余震的关系

由于研究区处于龙门山断裂带上, 断裂构造十分发育, 根据中国地震台网发布的汶川地震 M_s 4.0 以上目录, 截选 2009-11-04 ~ 2010-05-25 时间段进行研究(表 4), 此时间段内共有 6 次余震 $M_s \geq 4.0$ 。2010-04-20 ~ 2010-04-26, 钻探泥浆气体日平均值具有明显的异常, 此时间段内 $M_s \geq 2.0$ 的余震达 321 次, $M_s \geq 3.0$ 的余震达 152 次, 频繁的余震使钻探泥浆气体呈现明显的异常趋势(图 4)。

同时, WFSD-2 孔中钻探泥浆气体 CH_4 、He、 N_2 、 CO_2 、 H_2 、Ar 的浓度和 $\varphi_{N_2}/\varphi_{O_2}$ 、 $\varphi_{He}/\varphi_{Ar}$ 、 $\varphi_{N_2}/\varphi_{Ar}$ 的日均值变化也可能与该区的余震活动相关, 余震前后泥浆脱气气体浓度均表现出不同程度的高值或低值异常。

对于 2009-11-23 M_s 4.9 地震而言, 钻探泥浆气体浓度均有不太明显的异常出现, 其中 φ_{He} 、 φ_{N_2} 、

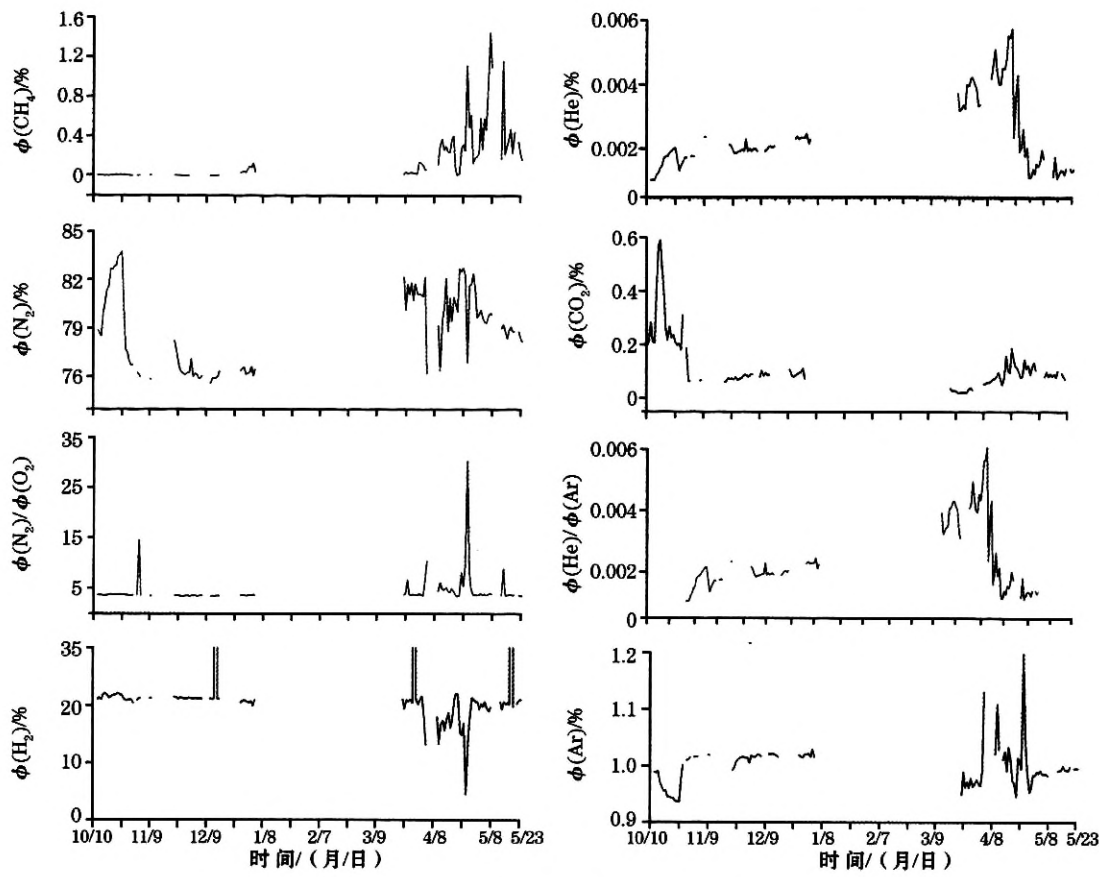


图 3 WFS-2 号孔钻探泥浆气体日平均值异常

表 4 2009-11-04 ~2010-05-25 汶川 $M_s \geq 4.0$ 地震目录

发震日期	发震时刻	纬度	经度	震级	参考地名
2009-11-23	15:25	31.0	103.2	4.8	四川省阿坝藏族羌族自治州汶川县
2009-11-28	00:04	31.3	103.9	5.0	四川省德阳市什邡市、成都市彭州市交界
2009-12-05	01:43	32.1	104.2	4.0	四川省绵阳市北川羌族自治县
2010-02-27	05:37	31.2	103.4	4.2	四川省阿坝藏族羌族自治州汶川县
2010-03-23	23:52	31.3	103.4	4.0	四川省阿坝藏族羌族自治州汶川县
2010-05-25	14:11	31.1	103.7	5.0	四川省成都市都江堰市、彭州市交界

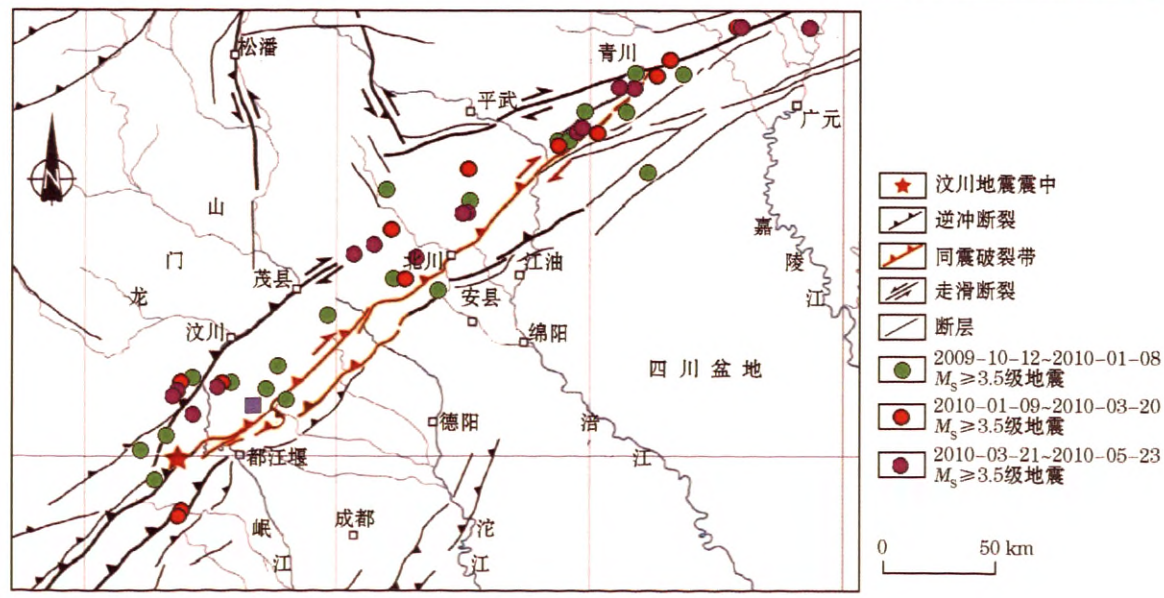


图 4 龙门山 $M_s \geq 3.5$ 不同时段的地震分布^[16]

$\varphi_{\text{He}}/\varphi_{\text{Ar}}$ 、 φ_{Ar} 在震前1天出现不太明显的高峰值,震前短期出现上升趋势,并在上升中发震,震后1天恢复到正常水平。 φ_{CH_4} 、 φ_{CO_2} 、 $\varphi_{\text{N}_2}/\varphi_{\text{O}_2}$ 、 $\varphi_{\text{He}}/\varphi_{\text{Ar}}$ 、 φ_{H_2} 异常变化不明显。

对于2009-11-28 M_s 5.0地震,在发震前3天, φ_{He} 呈现上升趋势,发震时出现正异常且峰值达到最高,并在震后2天恢复正常。 φ_{N_2} 分别在发震前2天以及震时出现高值正异常,同时震后1天呈现低峰值正异常。 φ_{CO_2} 在震前2天、发震时、震后1天出现了3次不太明显的正异常。 $\varphi_{\text{N}_2}/\varphi_{\text{Ar}}$ 在震前1天出现了不太明显的小高峰值,震时及震后1天恢复正常。 φ_{Ar} 在发震前4天出现一次正值高峰,而在发震时及震后1天出现1次低值负异常。

对于2009-12-05 M_s 4.0、2010-02-27 M_s 4.2余震,由于测试流体的仪器损坏,并没有及时测出这2次余震的相关数据。

对于2010-03-23 M_s 4.0地震来说,发震时Ar、 CH_4 、He、 H_2 、 N_2 浓度均表现出明显的高值异常, φ_{CO_2} 表现出明显的低值异常,而 φ_{O_2} 为负异常。

在龙门山断裂带上, M_s 3.5以上余震频发,但是在WFSD-2孔附近的余震次数有限。地震前后钻探泥浆气体均有不同程度的变化,某些时段内出现了明显的高值或低值异常。我们并不能确定异常一定由地震活动引起,但在钻探泥浆脱气气体异常出现的时段内确定发生过地震或小震群活动^[3],而且在异常处,如对应的岩石中发现了大量的裂隙、断层或破裂面^[18,20-21],推测这些异常很可能是地震活动引起岩层中的流体或深部流体沿裂隙运移,形成地下流体异常造成的^[3]。

5 结论

(1)WFSD-2孔的钻探泥浆气体浓度异常信息记录了余震前后的地下流体变化,反映出流体异常与岩芯岩石破裂程度的关系密切。余震发生时,岩石破裂会产生流体通道,使流体发生运移,可能导致钻探泥浆脱气气体异常,推测地下流体异常与地质构造环境有关。

(2)在600~630 m和630~800 m井段范围内,将He、Ar浓度及 $\varphi_{\text{N}_2}/\varphi_{\text{Ar}}$ 、 $\varphi_{\text{He}}/\varphi_{\text{Ar}}$ 进行归一化处理,得到的最大值和最小值所对应的井段是 $M_s \geq 3.0$ 余震的频发处,且多出现在岩石的裂隙、破裂面、断层处。推测钻探泥浆气体异常伴随着一些地震的发生而出现,但并不能确定某些时段的高值或低值异常一定由地震活动引起。

(3)钻探泥浆脱气气体的日平均值与余震活动

可能存在相互关联。 CH_4 、He、 N_2 、 CO_2 、Ar、 H_2 浓度和 $\varphi_{\text{N}_2}/\varphi_{\text{O}_2}$ 、 $\varphi_{\text{He}}/\varphi_{\text{Ar}}$ 均在 $M_s \geq 4.0$ 余震发生的前后几天出现不同程度的高或低值异常。然而,通过钻探泥浆脱气气体浓度或比值的日平均值变化推测地震信息,达到预测地震的目的,还需进一步研究。

致谢:感谢国家地质试验测试中心罗立强研究员对文章工作的大力支持,感谢现场实验室的聂武等提供了详实可靠的数据。

参考文献:

- [1] 车用太,谷元珠,鱼金子,等. 昆仑山口西 M_s 8.1地震前地下流体的远场异常及其意义[J]. 地震,2002,4:107-113.
- [2] 张国民,傅征祥,桂燮泰,等. 地震预报引论[M]. 北京:科学出版社,2001,334-365.
- [3] 孙青,李圣强,罗立强. 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,2005,25(1):15-21.
- [4] 高继宗. 中国古代的地震预测[J]. 国际地震动态,1996(04):7-16.
- [5] 刘俊新. 川-11井水位突跳对应地震初探[J]. 四川地震,2006(03):41-45.
- [6] 詹秀春,罗立强,李迎春,等. 关于CCSD主孔4 820~4 930 m井段气体异常的初步解释[J]. 中国地质,2005,32(2):320-329.
- [7] 罗立强,王健,李松,等. 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,2004,23(2):81-86.
- [8] 罗立强,孙青,詹秀春. 中国大陆科学钻探主孔0~2 000 m流体剖面及流体地球化学研究[J]. 岩石学报,2004,20(1):185-191.
- [9] 孙青,李圣强,罗立强. 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,2005,25(1):15-21.
- [10] 李圣强,孙青,罗立强,等. 中国大陆科学钻探主孔流体异常与其附近2次 M_L 3.9级地震的关系[J]. 中国地质,2005,32(2):330-335.
- [11] 胡新伟,吴山,邓江红. 龙门山中南段泰安寺—干沟—苍坪断裂构造特征及其地质意义[J]. 成都理工学院学报,2000,27(1):45-49.
- [12] 郭正吾,邓康龄,韩永辉. 四川盆地形成于演化[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [13] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1991.
- [14] 安其美,丁立丰,王海忠,等. 龙门山断裂带的性质与活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学,2004,24(2):115-119.
- [15] 孙青,李圣强,罗立强. 中国大陆科学钻探工程主孔流体地球化学异常与远强震的关系[J]. 岩石学报,2005,21(5):1501-1507.
- [16] 许志琴,李海兵,吴忠良. 汶川地震和科学钻探[J]. 地质学报,2008,82(12):1612-1622.
- [17] 唐力君,王健,王晓春,等. 汶川地震科学钻探实时流体分析仪器及应用[J]. 分析仪器,2010(2):11-16.

- [18] 孙青, 罗立强, 李圣强. 中国大陆科学钻探主孔 0 ~ 2 000 m 的 N_2 、Ar 和 He 流体地球化学[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 179 - 184.
- [19] 罗立强, 孙青, 詹秀春. 中国大陆科学钻探主孔 0 ~ 2 000 米流体剖面及流体地球化学研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 185 - 192.
- [20] 罗立强, 孙青, 詹秀春. 中国大陆科学深钻主孔流体剖面及流体地球化学研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 185 - 191.
- [21] 许志琴. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 1 - 8.

VARIATION OF DRILLING MUD GAS COMPONENTS AT 350 ~ 800 m INTERVAL OF No. 2 BOREHOLE OF SCIENTIFIC DRILLING FOR WENCHUAN SEISMIC FAULTED ZONE

LIU Shu-bo^{1,2}, TANG Li-jun², SUN Qing², CEN Kuang¹

(1. College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on data of some gas components in drilling mud at 350 ~ 800 m interval of No. 2 borehole for WFS and Richter earthquake magnitude $M_L \geq 3.5$ catalog as well as lithologic character of cores from the faulted zone of Wenchuan earthquake, the authors investigated the relationships of anomalies of drilling mud de-gas gaseous components to tectonic environment and earthquake activity. The results show that the shattering of rocks is maximum at the interval of 660 ~ 680 m, the normalized values of various gases also show obvious positive and negative anomalies, and the intervals corresponding to the maximum and minimum values are places where aftershocks higher than the magnitude $M_s 3.0$ frequently occur. The gas anomalies mostly occur in cracks in rocks, surface of fractures and faults.

Key words: faulted zone of Wenchuan fault; scientific drilling engineering; fluid analysis; anomaly of gas components

作者简介: 刘舒波(1986 -), 女, 硕士研究生, 地质工程专业。

上接 47 页

A COMPARISON STUDY OF NORMAL GRAVITY FORMULAE IN REGIONAL GRAVITATIONAL SURVEY

YANG Ya-bin, HAN Ge-ming

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: This paper briefly describes the definition of the normal gravitational field and the parameters that affect its value, compares the 1980 normal gravity formulae and CGCS2000 normal gravitational field parameters, makes a comparative analysis of the normal gravity and CGCS2000 normal gravitational field parameters used frequently in present gravitational exploration work, and deals with the necessity of popularizing the new normal gravity formulae in regional gravitational survey. A comparison between the normal gravitational field formulae deduced by four parameters of CGCS2000 and previously used normal gravitational field formulae shows that the former formulae are more scientific and advanced and can more accurately reflect real earth gravitational field.

Key words: normal gravity formula; CGCS2000; regional gravity survey

作者简介: 杨亚斌(1965 -), 男, 高级工程师, 现主要从事重力勘查工作。