中国科学: 地球科学 2012 年 第 42 卷 第 2 期: 178 ~ 190
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

准噶尔盆地南缘泥火山天然气的地球化学特征

戴金星*, 吴小奇, 倪云燕, 汪泽成, 赵长毅, 王兆云, 刘桂侠

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
* E-mail: djx@petrochina.com.cn

收稿日期: 2011-03-30; 接受日期: 2011-09-05

摘要 我国准噶尔盆地南缘发育多处泥火山, 1991 年 6 月和 2010 年 8 月, 两次对准噶尔盆地南缘泥火山进行考察. 从气压减小、出气量减少、泥浆池口陷落和泥浆池干涸等变化, 可见泥火山活动渐趋衰弱, 活动强度明显小于中国台湾一些泥火山. 泥火山天然气具有相似的地球化学特征, 表明其具有同源性或同因性. 泥火山天然气主要组分是烷烃气, 含量为 91.15%~97.49%, 其中甲烷含量最高, 是优质商业气; 天然气$\delta^{13}C_1$值为–49.1‰~–40.6‰, 与世界范围内泥火山气$\delta^{13}C_1$频率高峰段一致, 且烷烃气碳同位素系列具有$\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3$特征, 是典型热成因气; 研究区泥火山气具有较低的$^3He/^4He$值, R/Ra为 0.011~0.054, 属典型壳源氦; 泥火山天然气的$\delta^{13}C_2$值均大于–28‰, 是典型煤成气, 且C_1/C_{1-4}和$\delta^{13}C_1$值两指标与该盆地下中侏罗统源岩形成的煤成气特征一致, 因此, 准噶尔盆地南缘泥火山烷烃气的气源主要是下中侏罗统煤系源岩.

关键词
准噶尔盆地
泥火山
天然气
地球化学特征
气源

泥火山又称假火山, 是夹带着水、泥、砂和岩屑的地下天然气体, 在压力作用下不断的喷出地表所堆成的泥丘, 它是特定地质构造及水文地质环境下的一种构造流体地质现象. 泥火山的成因大致可以分为两类: 一种泥火山的形成与沉积作用有关, 这类泥火山在世界泥火山中占绝大多数, 多发育在油气藏发育地区, 如阿塞拜疆巴库地区的泥火山; 另一种泥火山的形成则与火山活动有关, 这类泥火山较少. 典型的如在美国的黄石公园[1]以及新西兰. 沉积类泥火山的形成需要以下条件: (1) 近期的构造活动特别是挤压作用; (2) 沉积或构造载荷导致快速沉积、增生或逆冲; (3) 烃类的连续产生; (4) 沉积层序上深部存在厚层、细粒、柔软和塑性的沉积物[2].

从全球而言, 泥火山在海底和陆上均有分布, 尽管泥火山可以发育于不同的构造环境, 但大多数位于挤压构造背景, 其中陆上泥火山主要沿着加勒比-太平洋带、喜马拉雅-阿尔卑斯造山带和中亚造山带分布, 而海底泥火山则在活动大陆边缘和被动大陆边缘均有分布[3~5]. 2002 年全世界已发现的陆上和海底泥火山分别超过 900 个和 800 个[2]. 阿塞拜疆南里海盆地巴库地区是世界上泥火山分布最为密集的地区, 目前已发现活动的泥火山(陆上和海底均有)超过 400 个[6]. 一般泥火山活动没有造成大的灾害, 但印度尼西亚东爪哇的“LUSI”泥火山, 不仅是世界上最大的灾害极大的并且喷发速率最快的泥火山, 其覆盖范围达 7 km^2, 导致 13000 个家庭失去家园[7]. 自从 2006 年 5 月 29 日喷发以来, 每天喷发出的泥

英文引用格式: Dai J X, Wu X Q, Ni Y Y, et al. Geochemical characteristics of natural gas from mud volcanoes in the southern Junggar Basin. Sci China Earth Sci, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4363-x

浆超过 100000 m^3[8], 预计该泥火山还将喷发超过 26 年[7].

据 1986 年初步统计, 我国已知的泥火山至少有 200 余处[9], 尽管在四川盆地渠江一带[10]、青藏高原可可西里地区[11]、青海柴达木盆地和江苏南部[9]均有发现, 但主要还是分布在中国台湾、新疆北部和藏北羌塘, 前人的关注也相对较多. Yang 等[12]、朱婷婷等[13]和 Sun 等[14]对台湾泥火山气体的组分、同位素组成和喷出速率及泥火山的形成机制等进行了分析. 新疆的泥火山主要分布在北天山地区, 均位于准噶尔盆地南缘山前坳陷带[15,16]. 最近在青藏高原北部羌塘中部也发现了泥火山, 泥火山喷出物中含沥青脉岩石的发现说明羌塘新生代沉积盆地具有良好的油气前景[17]. 尽管分布在新疆乌苏西南天山北麓山谷里的泥火山群曾被认为是亚洲最大的泥火山群[18], 但根据解超明等[17]的研究, 藏北羌塘中部的泥火山分布规模、喷口直径、泥丘高度等均要超过乌苏泥火山.

近年来对泥火山的研究取得了以下主要进展:

(1) 海底天然气水合物常与泥火山有关[19,20], 尽管并不是所有海底泥火山处都发育天然气水合物; 泥火山中部的天然气水合物的形成是水和甲烷渗滤驱动的过程, 而泥火山外围的天然气水合物则主要来自甲烷扩散和与水混合所驱动; 初步估计全球与泥火山相关的天然气水合物中聚集的 CH_4 总量在常温常压下大约为 $n\times10^{10}$~10^{12} m^3[19].

(2) 绝大部分泥火山喷出气体以 CH_4 为主, 小部分泥火山的以 CO_2 或 N_2 为主[2]. 泥火山是大气甲烷的重要来源之一[21], 每年通过泥火山向大气中排放的甲烷总量可达$(6\sim9)\times10^6$ t[21]或$(10.3\sim12.6)\times10^6$ t[2]或 33×10^6 t[22], 而这种排放对全球气候变化的影响可能从古生代就开始了[3], 因此在估算全球大气甲烷总量时不可忽略[2,21].

(3) 由于泥火山的出现通常与油气藏的分布有关, 因此二者关系常引起业内的关注[23,24], 泥火山排放出的气体可以为勘探沉积盆地的油气潜力提供有益的信息[18], 如阿塞拜疆南里海盆地泥火山分布表明与油气田有关[25,26], 新疆独山子泥火山也被认为与独山子油气田有紧密联系[16], 台西南盆地泥火山与油气运聚有着紧密联系[27].

(4) 由于断裂和裂隙等是泥浆和气体上升的通道, 因此泥火山常沿这些构造软弱带发育[12~14,17,19,28~30]. 泥火山是深埋沉积物最重要的排气通道[2], 全球陆上泥火山中约 76%排放出的气体为热成因气, 排出生物气和混合气的泥火山分别仅占 4%和 20%[31]. 分析泥火山气体的组分和同位素特征可以为研究深埋沉积物和油气资源提供有益的信息.

除中国台湾外, 中国大陆对泥火山的研究往往从基础地质的角度出发, 描述其形态和活动状况, 缺乏对泥火山天然气的系统研究. 解超明等[17]对藏北羌塘中部的泥火山的分布特征、喷发物中的沥青脉等进行了探讨, 但未采集泥火山的气体. 就新疆地区泥火山而言, 彭希龄[16]对其分布和地貌特征等进行了总结; 王道等[32]初步研究了独山子泥火山喷发的特征; 高小其等[33]研究发现, 新疆霍尔果斯泥火山活动与新疆地区中强以上地震的活动具有较好的对应关系, 且对预测未来地震的发震时间及震级都有一定的指导意义. 但目前尚没有对该区泥火山天然气分析研究的报道. 本次工作拟通过分析北疆地区泥火山天然气的组分和同位素特征, 来探讨其成因和气源, 并通过分析其与准噶尔盆地南缘油气藏的关系, 为寻找有利的油气勘探领域提供有益的信息.

1 泥火山地质与景观

泥火山分布在新疆准噶尔盆地南缘, 该区在构造上属于北天山山前坳陷, 其形成演化与北天山造山带紧密相关. 受不同强度变形和不同动力来源的影响, 准噶尔盆地南缘分布多个背斜, 其中泥火山主要分布在独山子、霍尔果斯、齐古等背斜和托斯台背斜群的冒烟山、北阿尔钦沟、马东刹拉等背斜上. 目前, 准噶尔南缘部分泥火山如霍尔果斯泥火山等已经停喷. 笔者 1991 年和 2010 年先后考察了独山子、冒烟沟、马东刹拉和阿尔钦沟相关泥火山(图 1, 2).

独山子泥火山位于独山子油矿市区南侧的背斜顶部山头上(图 2(a)), 独山子油气田是根据泥火山标志经勘探发现的. 该泥火山喷发初期有过爆发阶段, 后转入了宁静的泥水气泉喷发阶段, 随着油田的开发泄压, 泥火山活动日趋衰弱[16]. 1991 年考察时, 据新疆油田高级工程师范光华介绍, 1958 年前独山子泥火山锥状地貌明显, 由于大炼钢铁把泥火山锥铲平了, 有的充填了. 目前, 该区仅有两处活的泥火山喷口, 二者相距约 100 m, 其中位于西北部的泥火山为锥状(图 3(a), (b)), 而位于东南侧的则呈坑状(图 3(c)). 泥火山处出露地层为塔西河组, 泥火山有关参数见表 1.

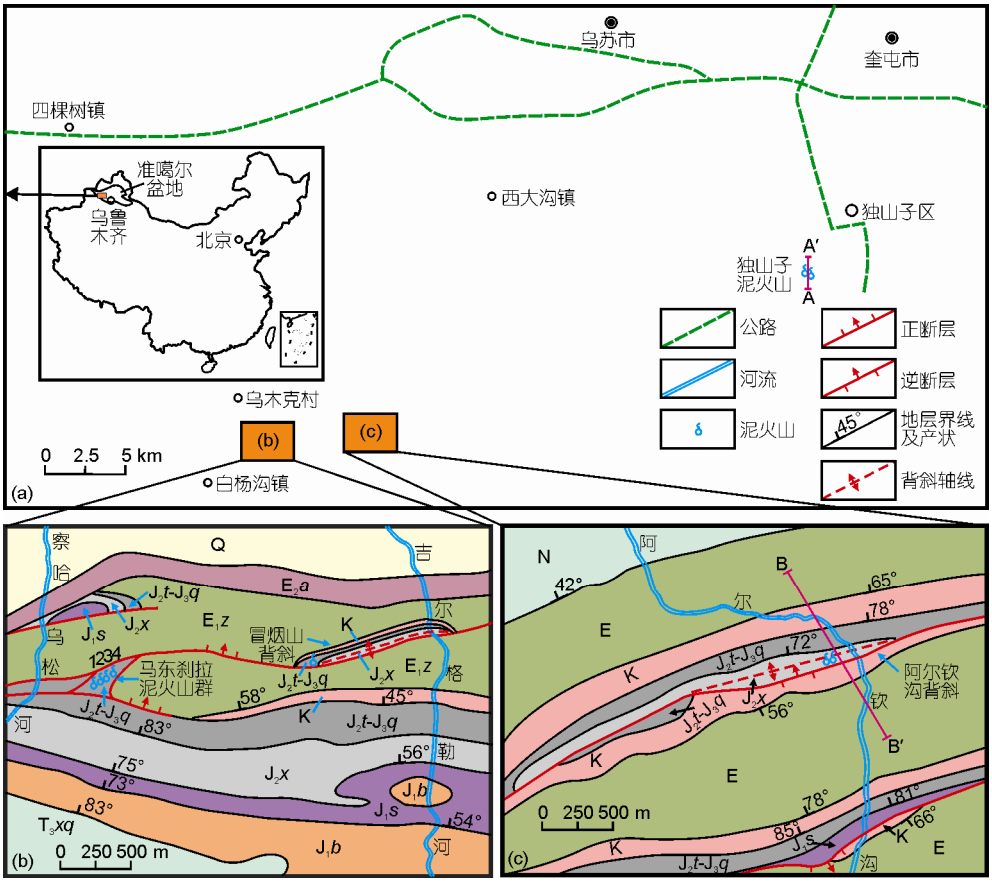


图 1　准噶尔盆地南缘泥火山(a)和马东剎拉和冒烟沟泥火山(b)、阿尔钦沟泥火山(c)位置图

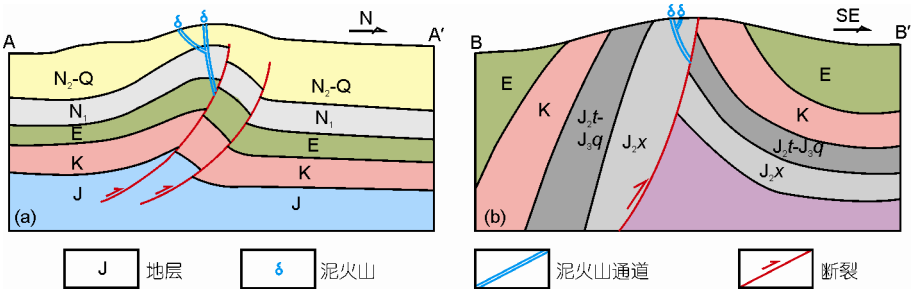


图 2　过独山子泥火山南北向剖面(a)和阿尔钦沟泥火山剖面(b)示意图

(a) 据文献[34]修改. A-A′和 B-B′位置分别见图 1(a)和(c)

马东剎拉泥火山位于乌苏市四棵树煤矿区察哈乌松河东岸山坡上, 处于侏罗系逆冲到古近系安集海河组泥岩上[16]. 该区总共有 20 多个泥火山集中分布在 500 m 范围内, 泥火山喷气, 大小不一, 喷出物中水多泥少, 部分泥火山喷出物中有油花. 2010 年从西向东近 200 m 内取了 4 个(1, 2, 3, 4)泥火山气样(图 1(b), 图 4, 表 1).

冒烟沟泥火山位于吉尔格勒河之西 1 km 冒烟山北坡的西段(图 1(b)), 有一片小的芦苇地. 区域内有 20 多个冒气口, 大部分泥火山口已经干涸、停喷(图 5), 泥火山有关参数见表 1.

阿尔钦沟泥火山位于北阿尔钦沟背斜轴部的断层线上(图 2(b)), 有两个锥状孪生泥火山坐落在河谷的沙石阶地上, 二者相距约 10 m, 形态完整(图 6),

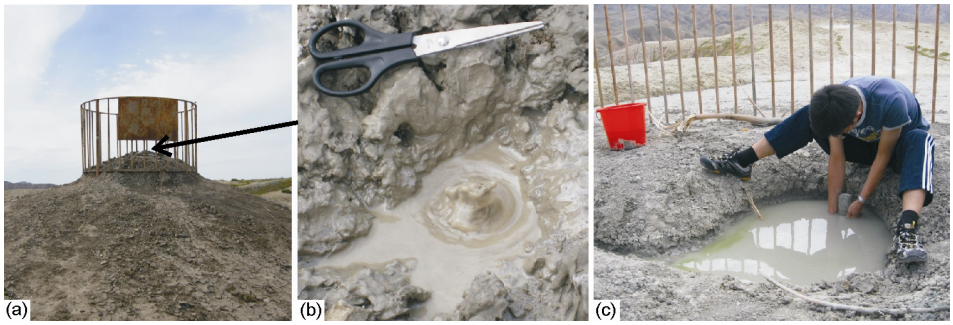


图 3　独山子西北泥火山((a), (b))和东南泥火山喷口(c)
位置见图 1(a)

表 1　准噶尔盆地南缘泥火山产状和喷气特征(2010 年考察结果)

泥火山	泥火山口长轴(m)	泥火山口短轴(m)	形状	描述	气泡最大直径(cm)	采样 250 mL 耗时(s)	估算年喷气(m^3)
独山子西北	0.1	0.08	锥状	锥高近 3 m, 喷出物多为泥浆, 水少, 呈粘稠状, 间歇状冒气	7	40	197
独山子东南	1.0	0.8	坑状	喷出物中水多泥少, 间歇状冒气, 有两处冒泡	6	660	24
马东刹拉 1	3.0	1.6	坑状	气泡不在火山口中心, 连续冒气, 一个大气泡伴随多个小气泡, 有油花	25	30	263
马东刹拉 2	1.1	1.0	坑状	气泡大的直径约 10 cm, 小的 1 cm, 连续冒气, 坑内有三处冒泡. 水多, 有一些油花	10	100	110
马东刹拉 3	1.3	1.0	坑状	中心有大气泡, 直径约 15 cm, 边缘有小气泡, 直径约 6~7 cm. 水多, 泥较多, 几乎没有油花	15	40	394
马东刹拉 4	2.3	2.0	坑状	水多, 有两处冒泡, 气泡大的直径 15 cm, 连续冒泡, 油花较少	15	50	473
冒烟沟	1.6	1.5	坑状	水多泥少, 连续冒泡且不停有油花冒出	5	130	61
阿尔钦沟西南 A	3.2	2.7	锥状	锥高近 6 m, 火山口半个的泥浆固结有泥裂. 未固结的泥浆有三处冒泡, 间歇性冒泡. 气泡直径约 10 cm, 水面浮一层油	10	25	946
阿尔钦沟东北 B	0.75	0.75	锥状	锥高近 8 m, 火山口一个大气泡后接数个小气泡, 如此循环, 没有外流沟, 较粘稠, 有油膜	25	50	158

且在地下是连通的. 该泥火山的喷发自晚更新世后期开始, 直至现在[16]. 阿尔钦沟泥火山是该区可称为壮观的标准泥火山, 锥形饱满夺人眼帘, 已被铁丝网围堵以保护并辟为旅游点. 泥火山有关参数见表 1.

2　气样分析和方法

泥火山气的组分和碳、氢同位素分析均在中国石油勘探开研究院廊坊分院, 碳同位素分析采用 Delta plus GC/C/IRMS 同位素质谱仪, 一个样品分析三次, 分析精度达到±0.5‰, 标准为 V-PDB. 氢同位素分析应用 MAT253 GC/C/IRMS 同位素质谱仪, 分析精度达±3‰, 标准为 V-SMOW. 氦同位素分析在中国科学院兰州地质研究所气体地球化学重点实验室, 采用 VG-5400MS 质谱计一次进样在线测量, 测试精度为 3%~5%. 上述分析测试结果见表 2.

3　泥火山活动日趋衰弱

1991 年 6 月和 2010 年 8 月, 作者相隔 19 年对研究区泥火山进行考察并取泥火山气样. 从气压、气量和泥火山口产状几方面先后两次进行对比, 可见泥火山活动渐趋衰弱.

1991 年取气样均以漏斗反扣各泥火山口泥浆池

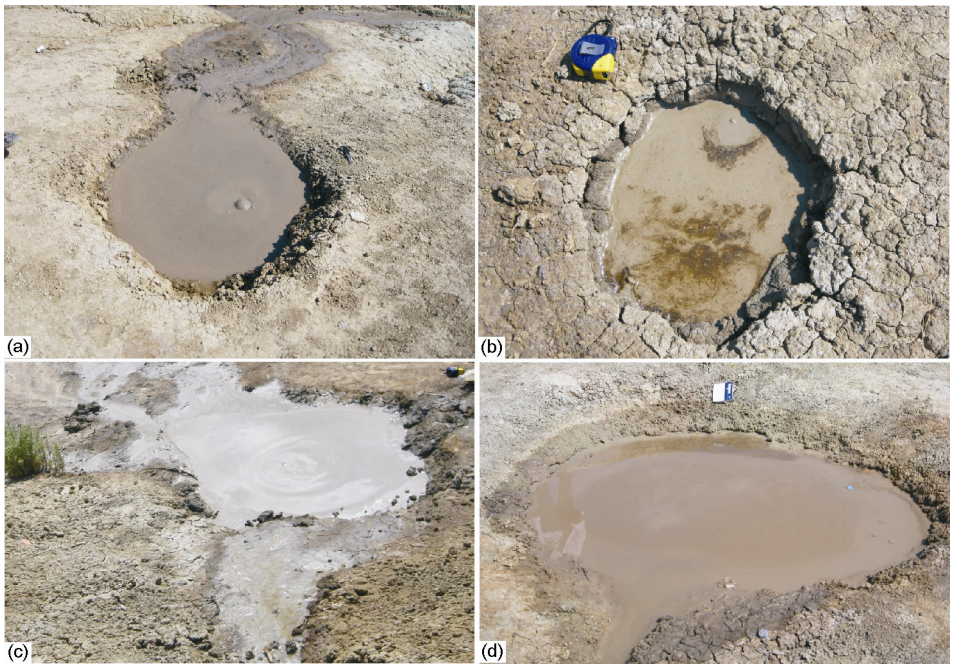


图 4　马东剎拉泥火山口照片

(a)~(d)分别对应图 1(b)中自左向右四个泥火山 1~4

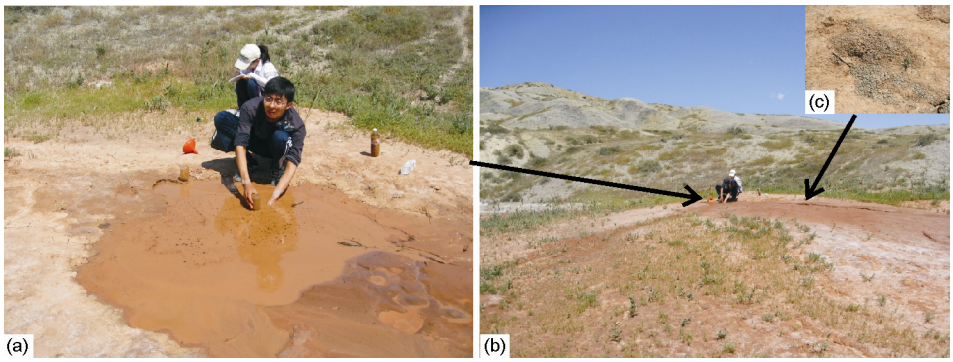


图 5　冒烟沟泥火山喷口及油花((a), (b))和附近已干涸的泥火山喷口(c)

位置见图 1(b)

出气点，以乳胶管接漏斗口把气导向盐水塑料桶内侧置玻璃瓶排水取气法获气样(图 7(b))．而 2010 年除独山子西北泥火山由于气压力大气量多用 1991 年法取样外，其余各泥火山由于气压降低了气量减少了，故只好把反扣漏斗对准泥火山口泥浆池冒气区，而漏斗细口伸入盐水瓶进行排水取气(图 3(c), 5(a))．先后两次取气样方式改变，反映了大部分泥火山气压降低了，出气量少了．

泥火山口的产状系指是否有泥浆池及其固结程度，泥浆池冒或喷气区占池面积大小，气泡大小及密度，气浆喷高，冒喷气连续性程度及气声响传播距离．1991 年在离阿尔钦沟泥火山 20~30 m 之外，就听到泥火山冒喷出气泡遇空气后破碎发出嘟噜声．阿尔钦沟西南泥火山口泥浆池面比外缘泥围堤仅低 1~3 cm，冒喷气呈圆状处于泥火山口中央，直径 92~95 cm，冒气柱高达 8~15 cm(图 7(a), (b))，根据当时取两个气样单位面积集气平均出气量，与冒喷气面积计算，该泥火山年出气量在 4674 m^3 多．2010 年该泥火山口泥浆池比外缘围堤低 80 cm，呈陷坑状，同时部分围堤呈内陷型塌落，泥浆池口右边由于无冒气致

表 2　准噶尔盆地南缘泥火山天然气地球化学参数

地址	经度(E)	纬度(N)	取样日期	分析日期	天然气组分(%)								δ^{13}C(‰, V-PDB)			δD(‰, V-SMOW)		^{3}He/^{4}He ($\times10^{-8}$)	*R*/*R*a
					CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	N_2	CO_2	C_{2-4}/C_{1-4}	C_1/C_{1-4}	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	CH_4	C_2H_6		
阿尔钦沟西南泥火山	84.49251°	44.18854°	2010-08-08	2010-08-30	87.48	5.53	0.02	0	1.45	5.45	0.0597	0.9403	–40.6	–27.8		–267	–196		0.021
			1991-06-05	1992-01-30	87.64	5.42			1.32	5.55	0.0582	0.9418	–41.6	–26.3				2.01±0.20	0.014
					87.59	5.71			1.25	5.44	0.0612	0.9388	–41.2	–25.8					
阿尔钦沟东北泥火山	84.49296°	44.18878°	2010-08-08	2010-08-30	87.37	4.74	0	0	1.43	6.40	0.0515	0.9485	–42.3	–27.5		–268	–194		0.026
			1991-06-05	1992-01-30	87.11	4.04				8.85	0.0443	0.9557	–41.6	–26.4				1.64±0.21	0.012
													–41	–26.6					
独山子东南泥火山	84.84725°	44.30463°	2010-08-07	2010-08-30	91.23	4.47	0.02	0	2.12	1.94	0.0469	0.9531	–42.2	–26.3	–9.4	–234	–179		0.042
			1991-06-04	1992-01-30	92.20	5.49	0.65	0.25	0.73	0.57	0.0648	0.9352	–41.8	–25.8	–19.4			4.75±0.29	0.034
													–41.7	–26.1	–19.3				
独山子西北泥火山	84.8463°	44.30521°	2010-08-07	2010-08-30	91.06	5.16	0.73	0.29	2.18	0.35	0.0636	0.9364	–41.9	–27.0	–20.5	–231	–179		0.054
四棵树冒烟沟泥火山	84.40855°	44.1837°	2010-08-08	2010-08-30	97.11	0.38	0	0	1.94	0.53	0.0039	0.9961	–49.1	–27.9		–241			0.034
四棵树冒烟山泥火山			1991-06-04	1992-01-30	89.61	7.47	0.12	0.01	2.54	0.19	0.0782	0.9218	–43.2	–26.1	–15.2			2.02±0.14	0.014
四棵树煤矿区马东剎拉泥火山群 1	84.38687°	44.18235°	2010-08-08	2010-08-30	88.22	7.16	0.1	0.01	4.36	0.09	0.0761	0.9239	–42.8	–26.4	–13.7	–233			0.011
2			2010-08-08	2010-08-30	86.56	10.50	0.01	0	2.23	0.65	0.1083	0.8917	–44.8	–25.4		–247	–184		0.024
3	84.38812°	44.18273°	2010-08-08	2010-08-30	89.76	7.08	0	0	2.85	0.22	0.0731	0.9269	–46.9	–26.0		–240	–180		0.024
4			2010-08-08	2010-08-30	88.71	8.42	0	0	2.66	0.15	0.0867	0.9133	–46.7	–25.9		–242	–176		0.019

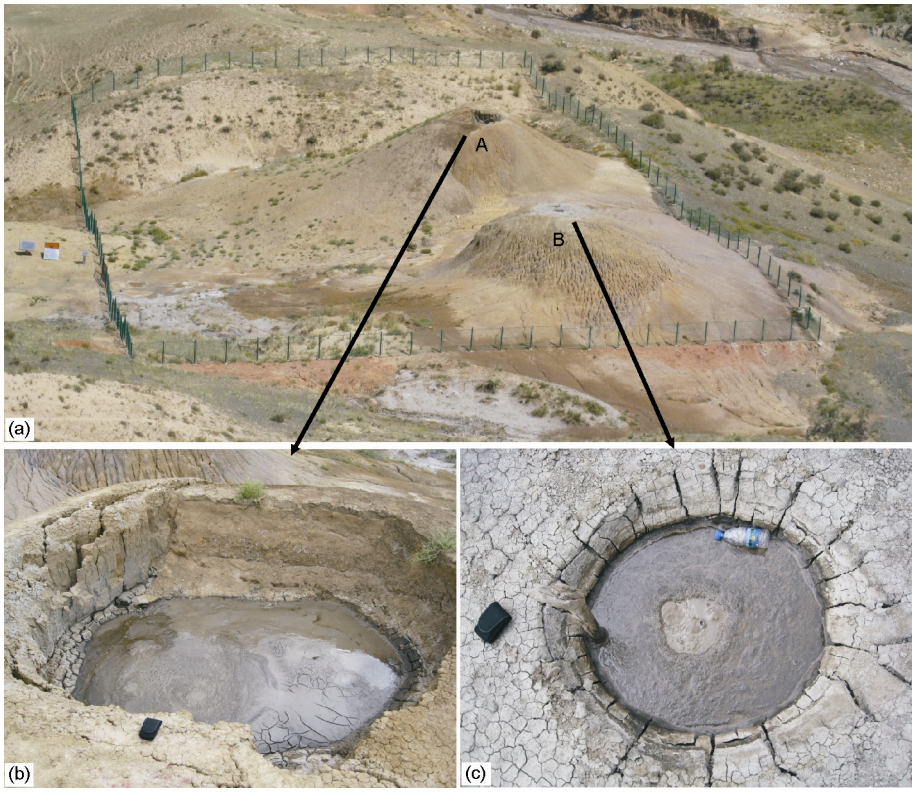


图 6　阿尔钦沟泥火山俯视图(a)和西南泥火山口(b)、东北泥火山口(c)

位置见图 1(c)



图 7　阿尔钦沟西南泥火山泥浆池口产状

(a) 1991 年; (b) 1991 年取气样; (c) 2010 年

使泥浆固结出现泥裂, 冒气区不在泥浆池口中央而在左边有三处间歇性冒气口(图 7(c)), 根据取气样单位面积平均出气量与出气面积计算 2010 年该泥火山出气量为 946 m^3(表 1), 仅为 1991 年出气量的 20.2%. 从 1991 年与 2010 年出气量、泥浆池口陷落、泥浆池干涸等对比, 可见该泥火山活动日益衰弱.

2010 年作者一行考察了台湾泥火山, 从乌山顶泥火山口(图 8(a))与新修女湖泥火山口(图 8(b))产状分析, 可见此两泥火山正处在活动强度大时期, 而准噶尔盆地泥火山活动显得逊色.

4　泥火山天然气组分的地球化学

表 2 中 16 个气样是相隔近 19 年分两批取的, 第一批气样除阿尔钦沟东北泥火山一个气样的碳同位素成果发表外[35],其他成果均未发表. 尽管相隔 19 年先后取气样, 但从表 2 中相同泥火山气样的天然气主要组分、碳同位素以及氦同位素(R/Ra)值相近性, 说明了这些泥火山天然气具有固定的同源性或为同因性.

泥火山天然气的主要组分是烷烃气, 含量从 91.15%(阿尔钦沟东北泥火山)至 98.59%(独山子东南泥火山), 其中甲烷含量最高, 从 86.56%(马东刹拉泥火山群 2 号)至 97.11%(冒烟沟泥火山)(图 9), 是优质商业气. 世界上 12 个国家和地区 201 个泥火山气甲烷含量从 7.4%(中国台湾 Chung-Lun 泥火山)至 99.54%(阿塞拜疆 Chukhuroglybozy 泥火山). 但除台湾的外, 绝大部分甲烷含量在 70%以上[31]. 烷烃气湿度(C_{2-4}/C_{1-4})从 0.0039(四棵树冒烟沟泥火山)至 0.1083(马东刹拉泥火山群 2 号), 主要区间为 0.0443~0.0867, 也就是说大部分泥火山天然气属于湿气, 即 $C_{2-4}/C_{1-4}>0.05$(表 2). N_2 的含量从 0.73%~4.36%, 一般在 1.25%~2.85%主频率区间(图 9). CO_2 的含量从 0.09%~8.85%, 0.20%~1.0%是主频率区间(约 60%)(图 9). N_2 和 CO_2 含量在常见天然气含量范围之内.

5　泥火山天然气的同位素特征

5.1　烷烃气碳同位素

由表 2 可知, 研究区泥火山气 $\delta^{13}C_1$ 值最重 −40.6‰(阿尔钦沟西南泥火山), 最轻的为−49.1‰(冒烟沟泥火山), 此区间值与世界 201 个泥火山气 $\delta^{13}C_1$

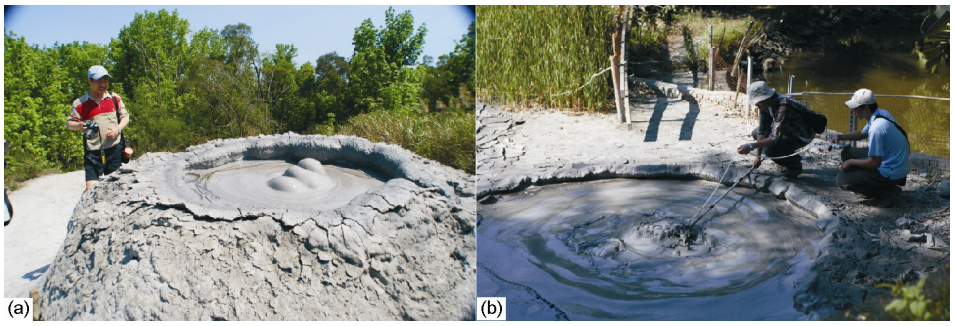


图 8　中国台湾一些泥火山口产状

(a) 乌山顶泥火山; (b) 新修女湖泥火山

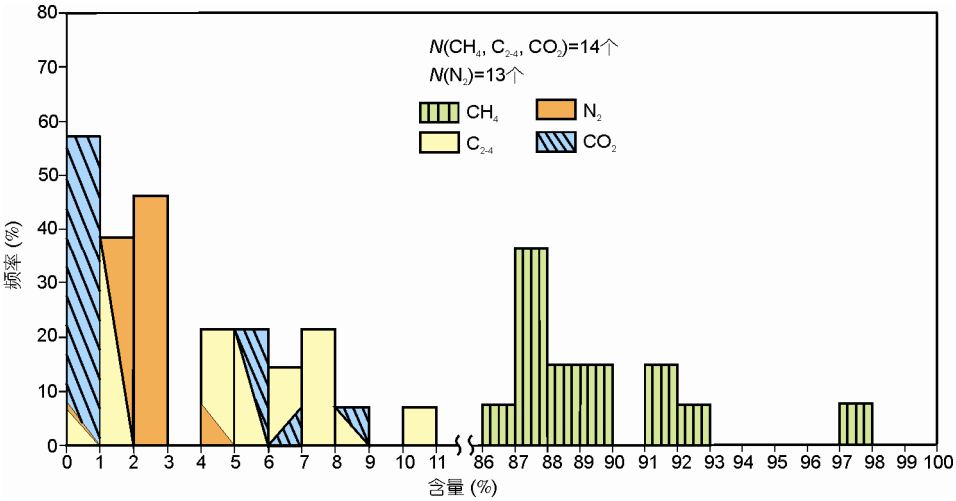


图 9　准噶尔盆地泥火山气组分含量频率图

频率高峰段一致(图 10)[31]. 本区泥火山$\delta^{13}C_1$频率峰在−40‰~−42‰(图 11). $\delta^{13}C_2$值最重为−25.4‰(马东刹拉泥火山群 2 号), 最轻−27.9‰(冒烟沟泥火山), 区间值仅为 2.5‰. $\delta^{13}C_3$值最重为−9.4‰(独山子东南泥火山), 最轻−20.5‰(独山子西北泥火山).

表 2 中烷烃气碳同位素系列具有$\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3$特征, 没有发生倒转, 表明烷烃气是有机成因的, 未受强的次生改造的原生烷烃气[36].

阿尔钦沟西南泥火山、阿尔钦沟东北泥火山和独山子东南泥火山分别在 1991 年和 2010 年先后取得天然气, $\delta^{13}C_1$, $\delta^{13}C_2$和$\delta^{13}C_3$分析值十分接近(表 2), 说明这些泥火山天然气具同源性或同因性.

5.2 烷烃气氢同位素

由表 2 可知, 泥火山烷烃气δD_1最重为−231‰(独山子西北泥火山), 最轻的为−268‰(阿尔钦沟东北泥火山), 比阿塞拜疆、格鲁吉亚、意大利、新西兰、巴布亚、罗马尼亚和土库曼斯坦泥火山气的δD_1值普遍要轻[31], 同时比我国台湾泥火山气δD_1多轻[31](图 12). 泥火山气δD_2最重为−176‰(马东刹拉泥火山群 4 号), 最轻的为−196‰(阿尔钦沟西南泥火山). 世界泥火山气的δD_2研究未见报道.

5.3 氦同位素

氦有 5 个同位素(^{3}He, ^{4}He, ^{5}He, ^{6}He, ^{8}He), ^{3}He 和 ^{4}He 是稳定同位素, 其余 3 个为不稳定同位素. ^{3}He 和 ^{4}He 在成因上有显著的差异, ^{3}He 是与地幔有关的原始成因氦; ^{4}He 是与地壳中放射性物质铀、钍α衰变有关. 在地球不同圈层中 ^{3}He/^{4}He 比值和 R/Ra(R 为样品中 ^{3}He/^{4}He, Ra 为大气中 ^{3}He/^{4}He)差异明显. 壳源氦的 ^{3}He/^{4}He 值随岩石类型不同有很大变化, 其范围值从 10^{-7}~10^{-9}, 典型值在 10^{-8}[37~38]. 戴金星等[39]根据鄂尔多斯盆地 46 个气样 ^{3}He/^{4}He 值为 3.18×10^{-8}~1.20×10^{-7}, 平均值为 4.36×10^{-8}, R/Ra 为 0.022~0.085, 认为均是壳源氦. 前苏联大陆区天然气中多数地壳气的 ^{3}He/^{4}He 在 7×10^{-9}~2×10^{-7}(R/Ra=0.005~0.1). 一般认为地壳氦的 R/Ra 值为 0.01~0.1[40~41]. 上地壳氦的 ^{3}He/^{4}He 正常值为 1.2×10^{-5}, 或在$(1.1\sim1.4)\times10^{-5}$[38,40].

由表 2 可知, 研究区泥火山气中 ^{3}He/^{4}He 值在 10^{-8}, R/Ra 在 0.011(马东刹拉泥火山群 1 号)~0.054(独

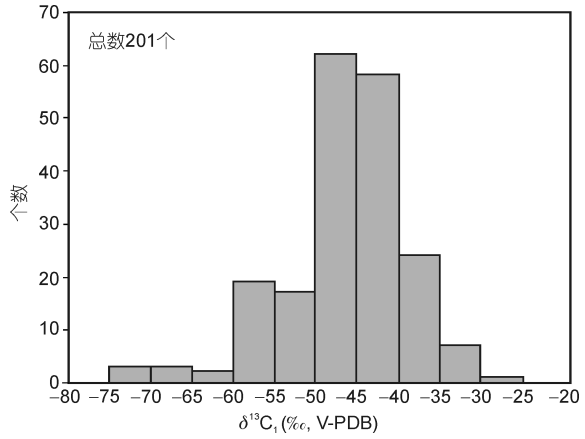


图 10 世界 201 个泥火山气$\delta^{13}C_1$频率图[31]

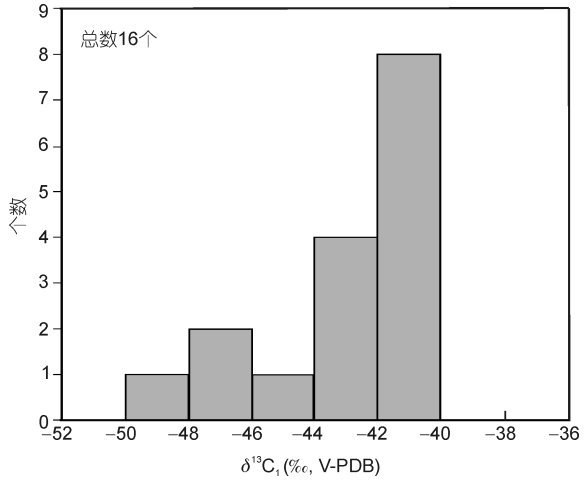


图 11 准噶尔盆地南缘泥火山气$\delta^{13}C_1$频率图

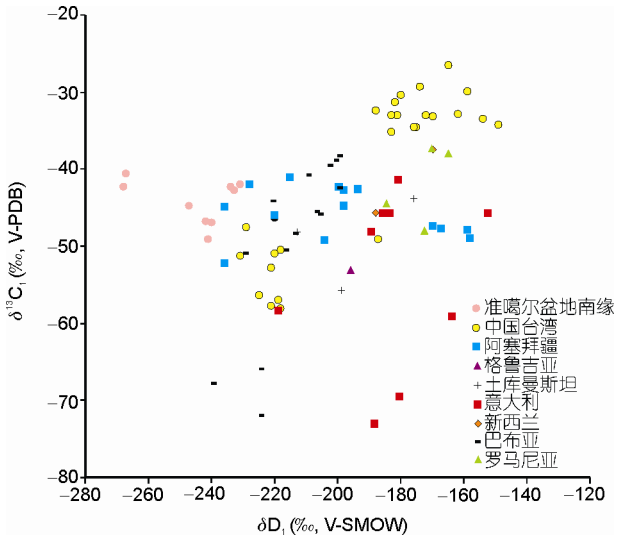


图 12 不同地区泥火山气δD_1-$\delta^{13}C_1$对比

准噶尔盆地南缘数据见表 2, 其余数据见文献[31]

山子西北泥火山), 在上述壳源氦 $^3He/^4He$ 和 R/Ra 数值域内, 故也应属壳源氦. 由表 2 可见, 独山子地区两个泥火山气的 R/Ra 值, 1991 年和 2010 年两次先后分析, 在研究区中是最高的, 即为 0.034 和 0.054. 此值与独山子油气田独 85 井 575~597 m N_2 地层中天然气 R/Ra 值 0.034 一致, 说明独山子地区泥火山天然气来源于深部地层.

6　泥火山天然气的成因类型和气源

6.1　成因类型

研究区泥火山气的主要组分是烷烃气, 其占相关气样组分 91.15%(阿尔钦沟东北泥火山)~97.49%(冒烟沟泥火山), 故着重探讨烷烃气的成因类型.

烷烃气随分子中碳数的渐增碳同位素逐渐变重, 即$\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3$是有机成因烷烃气的特点[36,42]. 由表 2 泥火山烷烃气具有$\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3$特征, 故肯定这些烷烃气是有机成因的. 众所周知根据烃源岩生气的成熟度, 有机成因气一般以$\delta^{13}C_1$值–55‰[43~45]为界, 轻于–55‰是生物成因气, 重于–55‰为热成因气. 根据表 2 中$\delta^{13}C_1$值比–55‰重的多, 故应归热成因气. 热成因气又依据成气源岩是腐殖型或腐泥型又分为煤成气和油型气, 因此泥火山的烷烃气应为此两种成因气之一.

根据相同或相近成熟度源岩形成的煤成气甲烷及其同系物的$\delta^{13}C$值, 比油型气对应组分的$\delta^{13}C$值重的特征[42]; 乙烷碳同位素组成受源岩成熟度的影响比甲烷同位素小, 即乙烷碳同位素组成对于源岩母质的碳同位素组成, 比甲烷碳同位素组成有较好的反映[46], 因此可利用乙烷碳同位素值来鉴别煤成气和油型气. 1988 年张士亚等[46]指出: 煤成气$\delta^{13}C_2>$–29‰, 油型气$\delta^{13}C_2<$–29‰; 戴金星等[42]指出煤成气$\delta^{13}C_2>$–25.1‰, 油型气$\delta^{13}C_2<$–28.8‰; 1994 年王世谦[47]对四川盆地从震旦系至侏罗系煤成气和油型气的烷烃气碳同位素作系统研究对比后指出: 煤成气$\delta^{13}C_2>$–29‰; 2005 年戴金星等[48]在综合研究全国大量煤成气和油型气的$\delta^{13}C_2$值后, 认为煤成气$\delta^{13}C_2>$–27.5‰, 油型气$\delta^{13}C_2<$–29‰; 2009 年 Dai 等[49]根据四川盆地须家河组大量烷烃气碳同位素组成研究得出: 煤成气$\delta^{13}C_2>$–28‰. 综合以上学者鉴定煤成气$\delta^{13}C_2$有四个值: >–29‰, >–28.0‰, >–27.5‰和>–25.1‰, 后三个值在研究者检验中国、德国、俄罗斯、加拿大和澳大利亚煤成气都符合. 由于煤成气$\delta^{13}C_2>$–28‰, 实际上包括>–27.5‰和>–25.1‰在内, 故三个值可以$\delta^{13}C_2>$–28‰来概括. 因此, 实际上作为鉴别标志值只剩下$\delta^{13}C_2>$–29‰和$\delta^{13}C_2>$–28‰两个值. 此两值可否合并或其中何值有代表性. 为此对我国具有$\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3<\delta^{13}C_4$原生型特征的油型气, $\delta^{13}C_2$最重值大于–29‰井作了挑选(表 3). 由表 3 可知, 我国油型气$\delta^{13}C_2$值在苏北盆地永 7 井和真 98 井可重达–28.4‰, 其他气(油)田也见到不少$\delta^{13}C_2$值–28.5‰~–28.9‰. 美国 Texas 州 Barnett 页岩气是油型气, 因为 50 个有效气样中 49 个$\delta^{13}C_2$值–29.4‰~–39.9‰, 仅有一个(Group 2B 之 Y)$\delta^{13}C_2$值为–28.1‰[50]. 据以上分析对比, 以$\delta^{13}C_2>$–28‰作为煤成气鉴别标志值较合适. 由于表 2 中泥火山天然气的$\delta^{13}C_2$值均大于–28‰, 所以准噶尔盆地南缘泥火山中烷烃气都是煤成气.

表 3　中国油型气$\delta^{13}C_2$最重值

气(油)田	井号	层位	井深(m)	天然气组分(%)						$\delta^{13}C$(‰, PDB)			
				CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	N_2	CO_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}
卧龙河	卧 2	T_1j^5	1633~1673	92.53	0.83	0.21	0.07	0.58	0.74	–32.8	–28.7	–23.5	
	卧 3	T_1j^5	1288	93.11	0.58	0.21	0.14	0.74	0.34	–32.7	–28.9	–24.3	
	卧 25	T_1j^5	1649.52~1690	92.27	0.87	0.23	0.07	0.55	0.71	–33.0	–28.9	–24.2	
	卧 13	T_1j^5	1570	92.40	0.80	0.20	0.16	0.78	0.46	–33.1	–28.7	–25.9	–24.2
普光	普光 2	T_1f^3	4776.8~4826	76.69	0.19	0	0	0.40		–30.9	–28.5		
枣园	枣 1235-1	Es_1	1756.6~1770	93.72	1.52	1.15	0.54	2.41	0.53	–47.8	–28.9	–28.3	
安茨	安 69-11	Es_3	2875.2~2838.4	90.31	6.49	2.32	0.3	0.36	0.52	–46.3	–28.8	–27.9	–27.4
别古庄	京 257	Es_4	1523~1591	97.51	1.17	0.33	0.15	0.32	0.44	–45.3	–28.5	–24.3	–23.8
永安	永 7	E_1d	2995.4~3029.4	84.05	8.04	2.93	1.65	1.36	1.22	–44.8	–28.4	–26.1	
真武	真 98	E_1d	2569.6~2713.0	84.64	8.52	3.75	1.44	0.77	0	–44.5	–28.4	–27.3	–27.3
尕斯库勒	跃 11-6	E_3^1	3221.0~3414.4	76.94	10.92	5.49	2.35	2.55	0.71	–42.0	–28.7	–26.3	–26.2

6.2 气源

准噶尔盆地目前发现有工业性煤成气的气源岩有两套: (1) 石炭系下统滴水泉组和上统巴塔玛依内山组, 均是煤系源岩, 源岩以腐殖型为主, 在盆地中部已发现千亿立方米以上克拉美丽大气田等, 气为干气[51~53], $C_1/C_{1\text{-}4}$ 值 0.960~0.975, 天然气地球化学特征见表 4. (2) 下中侏罗统八道湾组和西山窑组, 均为煤系源岩, 有机质类型以利于生气的Ⅱ$_2$-Ⅲ型为主. 烃源岩主要分布在盆地的中部与南部, 从盆地北部向南缘烃源岩埋深加大, 有机质成熟度逐渐增大, 盆地北部 R_o 为 0.58%~0.73%, 盆地腹部至南缘 R_o 值为 0.83%~2.5%[53]. 气以湿气为主, $C_1/C_{1\text{-}4}$ 值为 0.818~0.941, 仅有滴西 10 井(K_1h)等 4 口井 $C_1/C_{1\text{-}4}$ 值为 0.950~0.957, 即使 $C_1/C_{1\text{-}4}$ 最大值 0.957 也小于石炭系煤成气最小值 0.960. 因此, 石炭系源岩形成的煤成气比下中侏罗统形成的煤成气干.

由表 4 可知, 石炭系源岩形成的煤成气 $\delta^{13}C_1$ 值为–29.5‰~–30.5‰, 而下中侏罗统源岩形成的煤成气 $\delta^{13}C_1$ 值从–32.6‰(玛纳 1)至–40.7‰(独 62a), 即石炭系源岩形成煤成气比下中侏罗统源岩形成煤成气的 $\delta^{13}C_1$ 值重. 从滴西 10 井石炭系煤成气 $\delta^{13}C_1$ 值比下中侏罗统源岩形成聚集在下白垩统(K_1h)重约 4‰~5‰. 导致两者轻重不同, 是因为石炭系源岩成熟度高, 故其煤成气 $\delta^{13}C_1$ 值重, 而下中侏罗统源岩成熟度相对低, 故其煤成气 $\delta^{13}C_1$ 值轻.

可利用石炭系源岩形成的煤成气 $C_1/C_{1\text{-}4}$ 大和 $\delta^{13}C_1$ 值重, 而下中侏罗统源岩形成的煤成气 $C_1/C_{1\text{-}4}$ 小和 $\delta^{13}C_1$ 值轻这两个指标, 来判别两种源岩形成的煤成气. 由表 2 可知, 准噶尔盆地南缘泥火山天然气 $C_1/C_{1\text{-}4}$ 除四棵树冒烟沟泥火山的为 0.996 异常大外, 其他的均小于该盆地下中侏罗统源岩形成的最大值 0.957. 泥火山的 $\delta^{13}C_1$ 值–40.0‰~–49.1‰, 均轻于石炭系煤成气的 $\delta^{13}C_1$ 值–29.5‰~–30.5‰, 最重值 –40.0‰(表 2, 阿尔钦沟西南泥火山)与下中侏罗统源岩形成的煤成气 $\delta^{13}C_1$ 值–40.7‰(表 4, 独 62a)基本接近, 但绝大部分 $\delta^{13}C_1$ 值轻于–41‰. 基于泥火山天然气 $C_1/C_{1\text{-}4}$ 和 $\delta^{13}C_1$ 值两指标具有与该盆地下中侏罗统源岩形成煤成气的相同数值域的特征, 所以可以得出准噶尔南缘泥火山的烷烃气的气源, 是基本来自下中侏罗统源岩形成的煤成气. 在此“基本来自”的意思是由于: 一是 $C_1/C_{1\text{-}4}$ 值冒烟沟泥火山高达 0.996, 比石炭系煤成气的高得多, 是异常值; 二是因为冒烟沟泥火山 $\delta^{13}C_1$ 值为–49.1‰, 比其他泥火山的 $\delta^{13}C_1$ 值轻得多, 也是个异常值. 同一泥火山的烷烃气出现此两异常, 可能显示受到其他因素影响. 上述提到在冒烟沟泥火山有一片小的芦苇地(图 5(b)), 是否由芦苇形成几乎以甲烷为主的具有 $\delta^{13}C_1$<–55‰轻的生物

表 4 准噶尔盆地石炭系煤成气与下中侏罗统源岩形成的煤成气 $C_1/C_{1\text{-}4}$ 和 $\delta^{13}C$ 对比表

井号	层位	井深(m)	天然气主要组分(%)					$\delta^{13}C$(‰, PDB)				文献
			CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	$C_1/C_{1\text{-}4}$	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	
滴西 10	C	3070	91.67	2.54	0.76	0.44	0.960	–30.1	–27.7	–24.5		[53]
		3024	90.97	2.48	0.73	0.41	0.961	–29.5	–26.6	–24.6	–24.5	
	K_1h	1397	84.04	3.38	0.19	0.17	0.957	–34.4	–25.1			
滴西 8	J_1s	2253	87.27	4.58	1.85	1.09	0.920	–39.0	–27.7	–25.3	–26.3	
滴西 9	K_1	2110	89.85	3.27	1.31	1.00	0.941	–33.7	–27.2	–24.6	–26.3	
彩 31	C_2	3260	92.45	1.95	0.42		0.975	–29.5	–26.7	–25.6	–24.4	
	J_1b	2910						–38.0	–27.9	–24.8	–23.0	
彩 25	C_2	3028	94.37	2.13	0.46		0.973	–30.0	–24.2	–22.6	–22.3	
彩参 1	C_2	2862~2890	77.85	2.12	0.14		0.971	–30.5	–19.9			本文
独 1	N_1t	868	82.53	8.86	3.27	0.00	0.871	–37.5	–27.1	–24.4	–24.4	[53]
独 62a	E_3	1285~1926	80.02	4.29	2.57	1.38	0.906	–40.7	–26.5	–24.6	–23.4	
独 85	N_2	575~597	80.65	9.95	5.80	2.17	0.818	–40.4	–27.5	–22.7	–21.0	本文
霍 3	N_1-E_3	541~1135	84.92	5.07	0.93	0.34	0.930	–36.5	–22.5	–22.3	–21.6	
霍 10	$E_{1\text{-}2}z$	3064	90.13	6.39	1.41	0.70	0.913	–33.6	–23.0	–22.1	–22.0	[53]
		3159	83.85	9.91	3.14	1.47	0.852	–34.4	–24.1	–24.0	–23.9	
呼 2	$E_{1\text{-}2}z$	3594~3597	93.58	3.88	0.66	0.34	0.950	–37.8	–23.0	–21.3	–21.0	本文
玛纳 1	$E_{1\text{-}2}z$	2557~2561	93.01	3.63	0.45	0.16	0.956	–32.6	–25.1	–21.1		刘得光通
玛纳 2	$E_{1\text{-}2}z$	2520~2524	87.26	3.16	0.52	0.20	0.957	–32.8	–24.7	–24.1	–23.3	讯资料

气, 与从下中侏罗统源岩形成的煤成气的甲烷相混, 致使$\delta^{13}C_1$值变轻, $C_1/C_{1\text{-}4}$值变大.

7 结论

(1) 通过时隔 19 年两次对准噶尔盆地南缘泥火山的考察, 从气压减小、出气量减少、泥浆池口陷落和泥浆池干涸等变化, 可见该区泥火山活动渐趋衰弱.

(2) 泥火山天然气具有相似的地球化学特征, 表明其具有同源性或同因性. 泥火山天然气主要组分是烷烃气, 含量为 91.15%~97.49%, 其中甲烷含量最高, 是优质商业气; 天然气$\delta^{13}C_1$值为–49.1‰~–40.6‰, 与世界范围内泥火山气$\delta^{13}C_1$频率高峰段一致, 且烷烃气碳同位素系列具有$\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3$特征, 是典型热成因气; 研究区泥火山气具有较低的$^3He/^4He$值, R/Ra为 0.011~0.054, 属典型壳源氦.

(3) 泥火山天然气的$\delta^{13}C_2$值均大于–28‰, 是典型煤成气, 且$C_1/C_{1\text{-}4}$和$\delta^{13}C_1$值两指标与该盆地下中侏罗统源岩形成煤成气的特征一致, 因此, 准噶尔盆地南缘泥火山烷烃气的气源主要是下中侏罗统煤系源岩.

(4) 泥火山是勘探发现油气田的重要标志, 也是表征地下断裂的存在.

致谢 新疆油田公司勘探开发研究院范光华、袁文贤高级工程师指导泥火山踏勘与取样, 参加第一、二次取样的还有陈世加教授、宋岩教授级高级工程师、洪峰、胡国艺高级工程师和廖凤蓉博士, 审稿专家提出宝贵意见, 在此一并致谢.

参考文献

1 刘嘉麒. 大地“沸腾”——泥火山. 大自然探索, 2003, 22: 8–9
2 Dimitrov L I. Mud volcanoes—The most important pathway for degassing deeply buried sediments. Earth-Sci Rev, 2002, 59: 49–76
3 Kopf A J. Significance of mud volcanism. Rev Geophys, 2002, 40: 1005, doi: 1010.1029/2000RG000093
4 Etiope G, Caracausi A, Favara R, et al. Methane emission from the mud volcanoes of Sicily (Italy). Geophys Res Lett, 2002, 29: 1215, doi: 1210.1029/2001GL014340
5 Shakirov R, Obzhirov A, Suess E, et al. Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk Sea area. Geo-Mar Lett, 2004, 24: 140–149
6 Planke S, Svensen H, Hovland M, et al. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan. Geo-Mar Lett, 2003, 23: 258–268
7 Davies R J, Mathias S A, Swarbrick R E, et al. Probabilistic longevity estimate for the LUSI mud volcano, East Java. J Geol Soc, 2011, 168: 517–523
8 Mazzini A, Svensen H, Akhmanov G G, et al. Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia. Earth Planet Sci Lett, 2007, 261: 375–388
9 钟华邦. 我国的泥火山简述. 地质科技情报, 1986, 5: 58
10 陈秉范. 四川盆地式泥火山的发现. 地质论评, 1946, 11: 65–70
11 胡东生, 张华京. 青藏高原可可西里地区玛章错钦湖畔苟纠麦尕沟的泥火山机理雏议. 干旱区地理, 1998, 21: 13–18
12 Yang T F, Yeh G H, Fu C C, et al. Composition and exhalation flux of gases from mud volcanoes in Taiwan. Environ Geol, 2004, 46: 1003–1011
13 朱婷婷, 陆现彩, 祝幼华, 等. 台湾西南部乌山顶泥火山的成因机制初探. 岩石矿物学杂志, 2009, 28: 465–472
14 Sun C H, Chang S C, Kuo C L, et al. Origins of Taiwan’s mud volcanoes: Evidence from geochemistry. J Asian Earth Sci, 2010, 37: 105–116
15 王道. 新疆北天山地区泥火山与地震. 内陆地震, 2000, 14: 350–353
16 彭希龄. 谈谈新疆的泥火山. 西部油气勘探, 2007, 25: 71–81
17 解超明, 李才, 李林庆, 等. 藏北羌塘中部首次发现泥火山. 地质通报, 2009, 28: 1319–1324
18 范卫平, 郑雷清, 龚建华, 等. 泥火山的形成及其与油气的关系. 吐哈油气, 2007, 12: 43–47
19 Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. Mar Geol, 2000, 167: 29–42
20 Milkov A. Geological, geochemical, and microbial processes at the hydrate-bearing Håkon Mosby mud volcano: A review. Chem Geol, 2004, 205: 347–366
21 Etiope G, Milkov A V. A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere.

Environ Geol, 2004, 46: 997–1002
22 Milkov A V, Sassen R, Apanasovich T V, et al. Global gas flux from mud volcanoes: A significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean. Geophys Res Lett, 2003, 30: 1037, doi: 1010.1029/2002GL016358
23 Hedberg H D. Relation of methane generation to undercompacted shales, shale diapirs, and mud volcanoes. AAPG Bull, 1974, 58: 661–673
24 夏鹏, 印萍. 地中海海岭泥火山的构造特征及其油气意义. 海洋地质动态, 2008, 24: 1–6
25 Guliyev I S, Feizullayev A A. All about mud volcanoes, Azerbaijan, Baku. Baku: Nafta Press, 1997
26 段海岗, 陈开远, 史卜庆. 南里海盆地泥火山构造及其对油气成藏的影响. 石油与天然气地质, 2007, 28: 337–344
27 陈胜红, 贺振华, 何家雄, 等. 南海东北部边缘台西南盆地泥火山特征及其与油气运聚关系. 天然气地球科学, 2009, 20: 872–878
28 Kopf A J. Volcanoes: Making calderas from mud. Nat Geosci, 2008, 1: 500–501
29 Sawolo N, Sutriono E, Istadi B P, et al. The LUSI mud volcano triggering controversy: Was it caused by drilling? Mar Pet Geol, 2009, 26: 1766–1784
30 Manga M, Brumm M, Rudolph M L. Earthquake triggering of mud volcanoes. Mar Pet Geol, 2009, 26: 1785–1798
31 Etiope G, Feyzullayev A, Baciu C. Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin. Mar Pet Geol, 2009, 26: 333–344
32 王道, 李茂玮, 李锰, 等. 新疆独山子泥火山喷发的初步研究. 地震地质, 1997, 19: 14–16
33 高小其, 王海涛, 高国英, 等. 霍尔果斯泥火山活动与新疆地区中强以上地震活动关系的初步研究. 地震地质, 2008, 30: 464–472
34 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 天山两侧前陆冲断系构造样式与前陆盆地演化. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19: 727–741
35 戴金星. 我国煤成气资源勘探开发和研究的重大意义. 天然气工业, 1993, 13: 7–12
36 Dai J, Xia X, Qin S, et al. Origins of partially reversed alkane δ^{13}C values for biogenic gases in China. Org Geochem, 2004, 35: 405–411
37 O'Nions R K, Oxburgh E R. Heat and helium in the Earth. Nature, 1983, 306: 429–431
38 Ballentine C J, Burnard P G. Production, release and transport of noble gases in the continental crust. Rev Mineral Geochem, 2002, 47: 481–538
39 戴金星, 李剑, 侯路. 鄂尔多斯盆地氦同位素的特征. 高校地质学报, 2005, 11: 473–478
40 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学. 北京: 科学出版社, 1989. 1–451
41 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 天然气中稀有气体地球化学. 北京: 科学出版社, 1998. 17–25
42 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学(卷一). 北京: 石油工业出版社, 1992. 35–87
43 Высоцкий И. В. Геология природноч газа. Москва, Недра, 1979
44 Rice D D, Claypool G E. Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas. AAPG Bull, 1981, 65: 5–25
45 戴金星, 陈英. 中国生物气中烷烃组分的碳同位素特征及其鉴别标志. 中国科学 B 辑, 1993, 23: 303–310
46 张士亚, 郜建军, 蒋泰然. 利用甲、乙烷碳同位素判识天然气类型的一种新方法. 见: 地质矿产部石油地质研究所, 编. 石油与天然气地质文集(第一集). 北京: 地质出版社, 1988. 48–58
47 王世谦. 四川盆地侏罗系-震旦系天然气的地球化学特征. 天然气工业, 1994, 14: 1–5
48 戴金星, 秦胜飞, 陶士振, 等. 中国天然气工业发展趋势和天然气地学理论重要进展. 天然气地球科学, 2005, 16: 127–142
49 Dai J, Ni Y, Zou C, et al. Stable carbon isotopes of alkane gases from the Xujiahe coal measures and implication for gas-source correlation in the Sichuan Basin, SW China. Org Geochem, 2009, 40: 638–646
50 Rodriguez N D, Philp R P. Geochemical characterization of gases from the Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas. AAPG Bull, 2010, 94: 1641–1656
51 何登发, 陈新发, 况军, 等. 准噶尔盆地石炭系烃源岩分布与含油气系统. 石油勘探与开发, 2010, 37: 397–408
52 国建英, 李志明. 准噶尔盆地石炭系烃源岩特征及气源分析. 石油实验地质, 2009, 31: 275–281
53 李剑, 姜正龙, 罗霞, 等. 准噶尔盆地煤系烃源岩及煤成气地球化学特征. 石油勘探与开发, 2009, 36: 365–374