

新疆准噶尔盆地独山子泥火山天然气地球化学特征

高 苑^{1, 2)}, 王永莉^{1)*}, 郑国东¹⁾, 孟 培^{1, 2)},
吴应琴¹⁾, 杨 辉¹⁾, 张 虹¹⁾, 王有孝¹⁾

1)中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃兰州 730000;

2)中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要: 独山子泥火山位于新疆准噶尔盆地南缘, 地处北天山山前拗陷带的独山子背斜轴部。本文通过分析独山子泥火山喷出天然气组分及其碳同位素研究, 对天然气的来源进行了判识。3 个天然气样中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值均在 -41‰ 左右, $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)<20$, 为热成因气; $\delta^{13}\text{C}_{(\text{C}_2-\text{C}_1)}$ 在 15‰ 左右, iC_4/nC_4 和 C_2/C_3 值均较高, 说明天然气曾遭受了厌氧微生物降解作用; 其中两个喷口的天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值超过 +10‰, 说明天然气在受微生物降解后发生 CO_2 还原作用二次生成甲烷, 而另外一个喷口 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值无正异常, 未发生 CO_2 还原作用。不同喷口相同成因天然气在储藏或运移过程中发生不同的改造作用, 说明泥火山不同喷口对应不同的天然气运移通道或储藏条件。

关键词: 准噶尔盆地; 泥火山; 天然气; 碳同位素; 厌氧微生物降解

中图分类号: TE121.1; P317.3; P597.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.06.19

Geochemical Characteristics of Natural Gas from Dushanzi Mud Volcano in Junggar Basin, Xinjiang

GAO Yuan^{1, 2)}, WANG Yong-li¹⁾, ZHENG Guo-dong¹⁾, MENG Pei^{1, 2)},
WU Ying-qin¹⁾, YANG Hui¹⁾, ZHANG Hong¹⁾, WANG You-xiao¹⁾

1) Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000;

2) Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Dushanzi mud volcano is located on the axis of the Dushanzi anticline in northern Tianshan piedmont depression, which lies in the southern margin of the Junggar Basin, northwestern China. This study aims to identify the origin of the natural gases released by Dushanzi mud volcano by analyzing their geochemical characteristics, and the result shows that the gases should be attributed to a thermogenic source with $\delta^{13}\text{C}_1$ higher than -50‰ and $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$ lower than 20, and that oil or heavier hydrocarbon anaerobic biodegradation occurs along the seepage system of the mud volcano indicated by higher iC_4/nC_4 and C_2/C_3 values. The high $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ values of two gas samples from two different vents suggest secondary methanogenesis with CO_2 reduction after oil biodegradation, while isotopically enriched CO_2 is absent in the third vent. The variability of the $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ value might mean that the different vents of Dushanzi mud volcano might correspond to different circulation systems and different reservoirs.

Key words: Junggar Basin; mud volcano; natural gas; carbon isotope; anaerobic biodegradation

泥火山是指地下深处处于高压状态下的水和天然气, 通过地层裂隙、破碎带和断层等高渗透通道, 膨胀上升, 携带周围泥土岩屑喷出地表而形成的泥丘(刘嘉麒, 2003; 黄华谷等, 2011)。泥火山一般都处

本文由国家 973 计划项目(编号: 2012CB214701-05)、中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA05120204)、国家自然科学基金项目(编号: 41172169)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-EW-104)联合资助。

收稿日期: 2012-09-05; 改回日期: 2012-10-12。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 高苑, 女, 1987 年生。硕士研究生。主要从事有机地球化学研究。E-mail: gaoyuan_888@126.com。

*通讯作者: 王永莉, 女, 1969 年生。研究员。主要从事有机地球化学研究。E-mail: wyl6800@lzb.ac.cn。

于温和的, 间歇喷发或不喷发的休眠状态(Dimitrov, 2002)。与岩浆火山相似, 泥火山有时也会剧烈喷发, 在此期间可将泥团和灰分抛射到几千米的高空, 喷发出来的天然气甚至可以自燃产生巨大的火焰。泥火山的喷发物质不是来自地壳以下的高温高压岩浆, 而是来自不太深处(通常数千米)的低温泥砂质岩石、地下水和天然气(王道, 2000)。泥火山的喷发主要受以下几个因素控制: (1)近期的构造运动, 尤其是挤压类构造活动; (2)因快速的沉积作用、加积作用或逆冲断层作用形成的沉积荷载或构造荷载; (3)连续活跃的产生碳氢化合物; (4)沉积序列深部存在厚层、细粒、软化可塑的沉积物(Dimitrov, 2002)。

大部分泥火山喷出的天然气中甲烷是主要成分, 但少部分泥火山以 CO_2 和 N_2 为主(Dimitrov, 2002)。根据 201 个陆上泥火山的数据统计得出, 甲烷占泥火山气体喷出体积百分比平均为 90.6%, $\delta^{13}\text{C}_1$ 平均为 -46.5‰ 。全球范围内, 至少 76% 陆上泥火山喷出的气体为纯热成因气, 只有 4% 的泥火山排放的为生物成因气, 20% 泥火山排放的气体为混合成因气。泥火山排出的气体中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 变化范围较大 ($-20\text{‰} \sim +25\text{‰}$) (Etoipe et al., 2009a)。

天然气中甲、乙烷等烃类和二氧化碳的碳同位素组成及其时空变化特征是自然界生气物质成岩演化的直接结果, 因此可以作为探索天然气来源的可靠地球化学示踪剂(樊然学等, 2005)。本文通过分析准噶尔盆地南缘独山子泥火山天然气的组分和碳同位素特征, 探讨了其成因和气源。

1 独山子泥火山地质概况

准噶尔盆地位于中国新疆西北地区, 盆地南缘发育有多处泥火山, 独山子泥火山是其中之一(图 1)。该区在构造上属于北天山山前褶皱带(韩立国等, 2006; 秦黎明等, 2008), 其形成演化与北天山造山带紧密相关(高锐等, 2001; 李秋生, 2001; 戴金星, 2012)。独山子泥火山地处北天山山前拗陷带的独山子背斜轴部(如图 1 中剖面 AA' 所示), 此背斜为一封闭的储油气构造, 在背斜轴部分布着数条正断层和张性破裂带。据新疆石油管理局油田勘探资料, 新第三系下部(N_1)为主要含油气层。新生代第三系含泥、砂质地层, 封闭储油气构造中异常高的层间压力, 以及构造顶端发育的张性破裂是独山子泥火山活动的基本条件(王道等, 1997)。

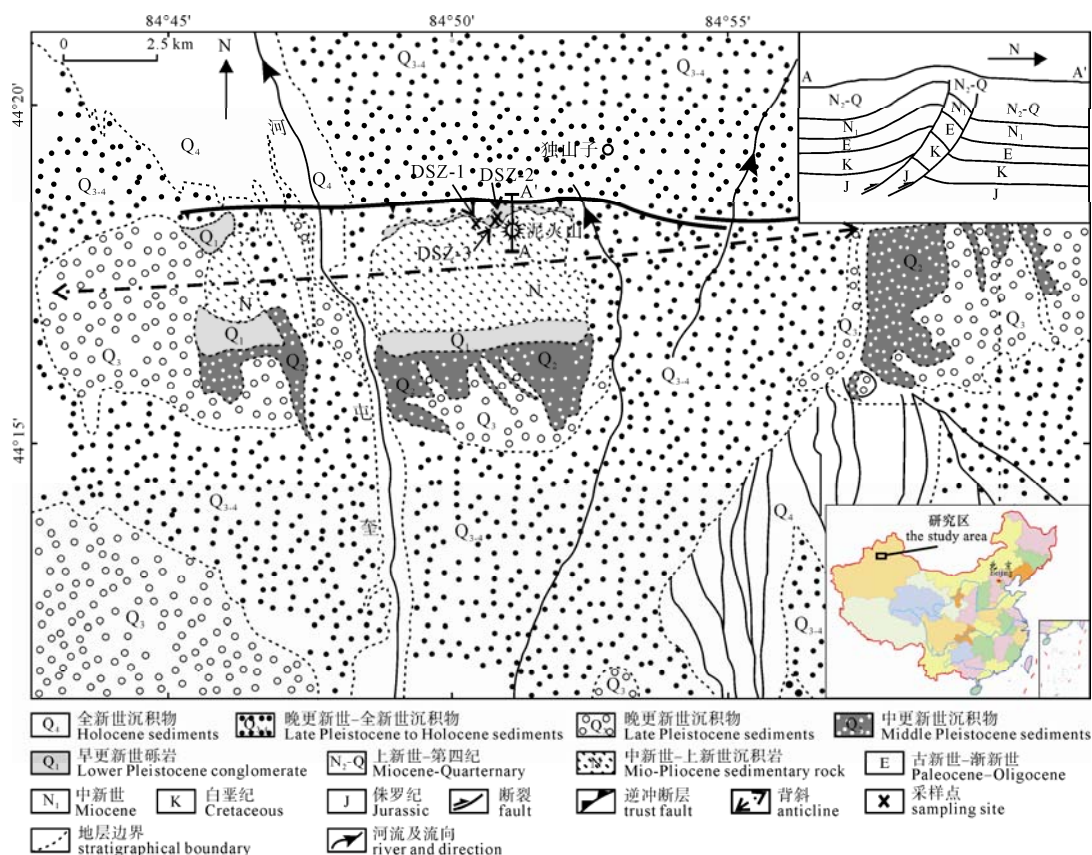


图 1 准噶尔盆地南缘独山子区域地质图(据 Zheng et al., 2010 修改)

Fig. 1 Geological map of Dushanzi region, south margin of the Junggar Basin(modified after Zheng et al., 2010)

AA'-过独山子泥火山南北向剖面(据戴金星等, 2012 修改)

AA'-SN-trending cross section of Dushanzi mud volcano(modified after DAI et al., 2012)

独山子泥火山距独山子油矿西南 1 km, 位于独山子背斜的顶部, 海拔 950 m 左右。该火山于 20 世纪 50 年代早期被发现, 70 年代以来从未活动过, 直到 1995 年 7 月突然喷发(王道等, 1997), 此后一直处于泥水气静流状态(彭希龄, 2007)。独山子泥火山顶部有直径约为 115 m 的很早以前喷发留下的泥火山口(DSZ-2), 现在为一个小泥火山湖, 湖面上有气泡冒出, 通过实地测量发现, 冒出的气体中甲烷含量很高。在大喷口周围分布有很多大小不一的小泥火山口, 其中有两个泥火山口(DSZ-1、DSZ-3)还在喷发泥水气。

2 样品采集和分析方法

研究用气体样品于 2011 年 9 月 25 日采集, 采样点位置及泥火山喷口大小见表 1, 泥火山口图片见图 2。每个采样点用排水取气法采集气样, 以进行分析。

泥火山天然气的组分和碳同位素组成分析在中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心进行。泥火山天然气组分测试仪为气体同位素质谱仪 MAT271, 天然气碳同位素测试仪器为 ThermoFinnigan 公司产 GC/TC/IRMS 色谱质谱联用仪, 质谱计为 DELTA Plus XP。

3 独山子泥火山天然气地球化学特征

3.1 天然气组分

独山子泥火山天然气分析测试结果列入表 2, 由表可见其主要成分是烷烃气。DSZ-1 和 DSZ-2 喷口烷烃气(C_1 - C_4)体积含量分别为 94.78%和 96.05%。

DSZ-3 喷口含量较低, 为 71.14%, 而氮气体积含量较高, 为 25.76%, 所采集的 3 个天然气样品中, 甲烷体积含量最高, 分别为 90.10%, 90.99%和 66.73%。 CO_2 含量分别为 3.22%, 0.60%和 2.62%。 N_2 体积含量分别为 1.92%、3.26%和 25.76%。

3.2 天然气稳定碳同位素特征

所采 3 个样品中, $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 、 $\delta^{13}C_3$ 值都很接近, DSZ-1、DSZ-2 和 DSZ-3 的 $\delta^{13}C_1$ 值分别为 -41.4‰、-41.6‰和 -40.7‰, $\delta^{13}C_2$ 分别为 -26.6‰、-26.7‰和 -26.6‰, $\delta^{13}C_3$ 值分别为 -10.9‰、-9.6‰和 -21.1‰。与烷烃气碳同位素特征不同的是, 3 个喷口的 CO_2 碳同位素值之间存在明显差异。DSZ-1 和 DSZ-3 的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值分别为 +13.7‰和 +11.9‰, 而 DSZ-2 的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值为 -6.6‰(表 2)。

4 独山子泥火山天然气成因类型和气源

在 $\delta^{13}C_1$ 和 $C_1/(C_2+C_3)$ 关系图上(Bernard et al., 1978), 结果显示 3 个样品点均落在热成因区域(图 3), 说明独山子泥火山的烷烃气为热成因气。烷烃气碳同位素系列均具有 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$ 规律, 没有倒转现象, 表明烷烃气为有机成因, 未受到强烈的次生改造(Dai et al., 2004)。3 个样品的 $\delta^{13}C_2$ 值均 > -28 ‰, 为煤型气, 与戴金星等(2012)研究结果一致。3 个样品干燥系数($C_1/(C_1+C_5)$)分别为 0.950、0.947 和 0.936, 均为较湿型气。

N_2 是天然气中常见的非烃组分之一, 由于其某些物理化学性质比其他非烃成分更接近烃类气, 故其成因及分布富集规律常常与烃类气体存在密切的联系。在 DSZ-3 所采样品中氮气含量较高, 所占体



图 2 准噶尔盆地独山子泥火山喷口(位置及大小见表 1)

Fig. 2 Vents of Dushanzi mud volcano, Junggar Basin (locations shown in Table 1)

表 1 采样喷口位置及喷口大小

Table 1 Coordinates, altitude and size of the sampling mud volcano vents

采样编号	东经	北纬	海拔/m	喷口长轴/m
DSZ-1	84°50.355'	44°18.234'	949	1.2
DSZ-2	84°50.843'	44°18.315'	942	115
DSZ-3	84°50.781'	44°18.312'	939	0.2

表 2 准噶尔盆地独山子泥火山天然气地球化学参数
Table 2 Geochemical parameters of natural gas from Dushanzi mud volcano, Junggar Basin

样品	DSZ-1	DSZ-2	DSZ-3
天然气组分体积含量/%			
C ₁	90.10	90.99	66.73
C ₂	4.65	4.84	3.52
C ₃	0.03	0.19	0.61
CO ₂	3.22	0.60	2.62
iC ₄	0.0028	0.024	0.21
nC ₄	0.0009	0.0035	0.073
iC ₅	0.0085	0.0080	0.12
nC ₅	0.0025	0.0064	0.0094
C ₆	0.051	0.037	0.069
N ₂	1.92	3.26	25.76
Ar	0.017	0.051	0.28
组分比			
C ₁ /(C ₁ -C ₅)	0.950	0.947	0.936
C ₁ /(C ₂ +C ₃)	19.25	18.09	16.16
C ₂ /C ₃	155.00	25.47	5.77
iC ₄ /nC ₄	3.11	6.86	2.88
N ₂ /Ar	112.94	63.92	92.00
$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$			
$\delta^{13}\text{C}_1$	-41.4	-41.6	-40.7
$\delta^{13}\text{C}_2$	-26.6	-26.7	-26.6
$\delta^{13}\text{C}_3$	-10.9	-9.6	-21.1
$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$	+13.7	-6.6	+11.9
$\delta^{13}\text{C}_{(\text{C}_2-\text{C}_1)}$	14.8	14.9	14.1

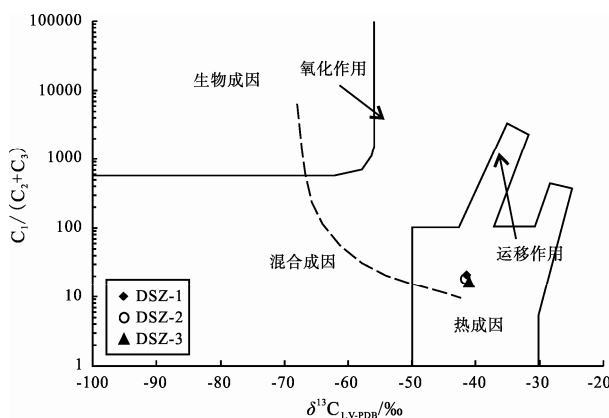


图 3 泥火山 $\delta^{13}\text{C}_1$ 和 $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$ 关系图
(据 Bernard et al., 1978)

Fig. 3 Methane carbon isotope versus HC molecular diagram for Dushanzi mud volcano (after Bernard et al., 1978)

积比为 25.76%, α 系数 ($\alpha=100\text{Ar}/1.18\text{N}_2$) 为 0.92, N_2/Ar 比值为 92.00, 属于壳源型有机成因富 N_2 天然气(何家雄, 2000)。

我国有机成因 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 区间值在 $-39\text{‰} \sim$

-8‰ , 无机成因的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 区间值在 $-16\text{‰} \sim +7\text{‰}$ (戴金星等, 1992)。Etiope 等(2009b)通过调查资料发现, 分布在 9 个国家或地区的 134 个陆上泥火山中 50% 的泥火山有富重碳同位素的 CO_2 ($\delta^{13}\text{C} > +5\text{‰}$) 喷出。因此可以推断, 泥火山天然气中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值的正异常源于泥火山系统内的某种作用。Etiope 等(2009b)认为, 在泥火山气来源储层或扩散通道中, 厌氧微生物降解原油或重烃类生成 CO_2 , CO_2 在微生物作用下发生还原反应生成甲烷, 导致反应剩余的 CO_2 富含重同位素。 CO_2 发生还原作用生成的 CH_4 富集轻同位素。

在所采 3 个天然气样品中, DSZ-1、DSZ-3 喷口的天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值分别为 $+13.7\text{‰}$ 和 $+11.9\text{‰}$, 说明这两个喷口的气体在溢出之前遭受了厌氧微生物降解作用。DSZ-1 和 DSZ-2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 值并没有明显降低, 且都大于 -55‰ , 说明厌氧微生物降解作用对烷烃类同位素组成影响不大。

本次研究在白杨沟泥火山(据独山子泥火山约 40 km)采得喷出泥样, 经分析发现有以 CH_4 和 CO_2 做为碳源生长的古老厌氧细菌和厌氧喜温的产甲烷古菌。独山子泥火山菌种还在分析中, 相关数据需进一步研究。

同一泥火山的不同喷出口, 或同一喷出口在不同时间所观测到的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 可以存在很大差别, 浮动可达 $\pm 50\text{‰}$ 。不同喷出口的 CO_2 同位素差异可能是因为泥火山的不同喷出口对应不同的流通系统, 或者对应不同的储层。Favara 等(2001)和 Mizobe 等(2007)通过分析意大利和日本的泥火山, 发现泥火山的同一喷出口在不同的时间 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 发生浮动, 并在其所对应的储层中也检测到了 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值的相应变化, 表明 CO_2 的同位素组成在储层就非常不稳定, 可能是因为受气-水-岩石作用的多重影响(Etiope, 2009b)。

厌氧微生物降解原油或重烃类生成 CO_2 之后不一定会发生二次甲烷生成反应(Wang et al., 2005), 这与油气藏中菌群种类和油气藏物理化学条件有关。因此没有观测到富集重碳同位素的 CO_2 不能说明没发生厌氧微生物降解。厌氧微生物降解作用选择性分解 C_3 化合物和正构烷烃, 使得相邻碳数的正构烷烃发生大的同位素分馏 ($\delta^{13}\text{C}_{(\text{C}_2-\text{C}_1)} > 15\text{‰}$), 并使 C_2/C_3 和 iC_4/nC_4 比值升高, 因此 C_2/C_3 和 iC_4/nC_4 比值可用来指示厌氧微生物降解作用有无发生(Pallasser, 2000; Waseda et al., 2008)。DSZ-2 的 C_2/C_3 、 iC_4/nC_4 值分别为 25.47 和 6.86, 说明其同样

遭受了厌氧微生物降解作用。在三个样品的 $\delta^{13}\text{C}_{(\text{C}_2-\text{C}_1)}$ 值和 C_2/C_3 、 $i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 关系图上(图 4)可见, 3 个喷口所采气体的分析数据均可表明独山子泥火山天然气经受了微生物降解作用, DSZ-3 较轻微。

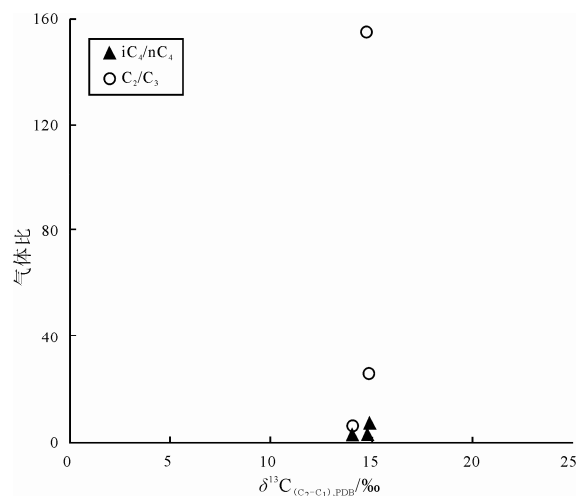


图 4 乙烷甲烷碳同位素分馏值与气体比关系图
(据 Pallasser, 2000 修改)

Fig. 4 The relationship of gas ratios to methane-ethane carbon isotopic separations (modified after Pallasser, 2000)

5 结论

独山子泥火山天然气中的烷烃类为有机来源的热成因气, 并遭受厌氧微生物的轻微降解作用。DSZ-1 和 DSZ-3 气体被厌氧微生物降解后又发生了 CO_2 还原反应, 并再次产生甲烷, 而从 DSZ-2 喷出的天然气没有发生 CO_2 还原反应, 说明 3 个喷出口的天然气的储层或气源的通道可能不同, 具体原因需要进一步研究。

参考文献:

- 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 1992. 中国天然气地质学: 卷一[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 戴金星, 吴小奇, 倪云燕, 汪泽成, 赵长毅, 王兆云, 刘桂侠. 2012. 准噶尔盆地南缘泥火山天然气的地球化学特征[J]. 中国科学(地球科学), 42(2): 178-190.
- 樊然学, 周洪忠, 蔡开平. 2005. 川西坳陷南段天然气来源与碳同位素地球化学研究[J]. 地学学报, 26(2): 157-162.
- 高锐, 管烨, 贺日政, 史大年, 李德兴, 李秋生, 卢德源, 李力军. 2001. 新疆地质断面(独山子-泉水沟)走廊域及邻区地球物理调查综合研究[J]. 地球学报, 22(6): 527-533.
- 韩立国, 张枝焕, 李伟. 2006. 准噶尔盆地中部区块现今油气运移方向研究[J]. 地球学报, 27(4): 335-340.
- 何家雄, 李明兴. 2000. 南海北部大陆架 Y 盆地天然气中 N_2 成因

- 及气源剖析与探讨[J]. 天然气地球科学, 11(3): 25-34.
- 黄华谷, 邸鹏飞, 陈多福. 2011. 泥火山的全球分布和研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(2): 191-197.
- 李秋生, 卢德源, 高锐, 张之英, 刘文, 李英康, 李敬卫, 范景义, 熊贤明. 2001. 新疆地质断面(泉水沟-独山子)深地震测深成果综合研究[J]. 地球学报, 22(6): 534-540.
- 刘嘉麒. 2003. 大地“沸腾”——泥火山[J]. 大自然探索, 22(8): 8-9.
- 彭希龄. 2007. 谈谈新疆的泥火山[J]. 西部油气勘探, 25: 71-81.
- 秦黎明, 张枝焕, 李伟, 杨永才, 袁东山. 2008. 准噶尔盆地中部 III 区块原油中 25-降藿烷分布特征与成因意义[J]. 地球学报, 29(4): 478-485.
- 王道, 李茂玮, 李猛, 戴晓敏. 1997. 新疆独山子泥火山喷发的初步研究[J]. 地震地质, 19(1): 14-16.
- 王道. 2000. 新疆北天山地区泥火山与地震[J]. 内陆地震, 14(4): 350-353.

References:

- BERNARD B B, BROOKS J M, SACKETT W M. 1978. Light hydrocarbons in recent Texas continental shelf and slope sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 83(C8): 4053-4061.
- DAI Jin-xing, PEI Xi-gu, QI Hou-fa. 1992. Natural gas geology in China(Vol 1)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- DAI Jin-xing, WU Xiao-qi, NI Yun-yan, WANG Ze-cheng, ZHAO Chang-yi, WANG Zhao-yun, LIU Gui-xia. 2012. Geochemical characteristics of natural gas from mud volcanoes in the southern Junggar Basin[J]. Science China (Earth Science), 55(3): 355-367.
- DAI Jin-xing, XIA Xin-yu, QIN Sheng-fei, ZHAO Jing-zhou. 2004. Origins of partially reversed alkane $\delta^{13}\text{C}$ values for biogenic gases in China[J]. Organic Geochemistry, 35(4): 405-411.
- DIMITROV L I. 2002. Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments[J]. Earth Science Reviews, 59(1-4): 49-76.
- ETIOPE G, FEYZULLAYEV A, BACIU C L. 2009a. Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin[J]. Marine and Petroleum Geology, 26(3): 333-344.
- ETIOPE G, FEYZULLAYEV A, MILKOV A V, WASEDA A, MIZOBE K, SUN C H. 2009b. Evidence of subsurface anaerobic biodegradation of hydrocarbons and potential secondary methanogenesis in terrestrial mud volcanoes[J]. Marine

- and Petroleum Geology, 26(9): 1692-1703.
- FAN Ran-xue, ZHOU Hong-zhong, CAI Kai-ping. 2005. Carbon isotopic geochemistry and origin of natural gases in the southern part of the western Sichuan Depression[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(2): 157-162(in Chinese with English abstract).
- FAVARA R, GIOIA C, GRASSA F, INGUAGGIATO S, PROIETTO F, VALENZA M. 2001. Studio geochimico delle manifestazioni fluide presenti nell'area della riserva naturale integrale "Macalube di Aragona"[J]. Naturalista Siciliano, 25: 137-154.
- GAO Rui, GUAN Ye, HE Ri-zheng, SHI Da-nian, LI De-xing, LI Qiu-sheng, LU De-yuan, LI Li-jun. 2001. The integrated geophysical observation and research along the Xinjiang(XUAR) geotransect and its surrounding areas[J]. Acta Geoscientica Sinica, 22(6):527-533(in Chinese with English abstract).
- HAN Li-guo, ZHANG Zhi-huan, LI Wei. 2006. An Analysis of the Present Oil Migration Direction of Block I in Central Junggar Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(4): 335-340(in Chinese with English abstract).
- HE Jia-xiong, LI Ming-xing. 2000. N₂ origin analyze in natural gas of Y Basin in the north of Nanhai, China[J]. Natural Gas Geoscience, 11(3): 25-34((in Chinese with English abstract).
- HUANG Hua-gu, DI Peng-fei, CHEN Duo-fu. 2011. Global Distribution and Research Progress of Mud Volcanoes[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 30(2): 191-197(in Chinese with English abstract).
- LI Qiu-sheng, LU De-yuan, GAO Rui, ZHANG Zhi-ying, LIU Wen, LI Ying-kang, LI Jing-wei, FAN Jing-yi, XIONG Xian-ming. 2001. An integrated study of deep seismic sounding profiling along Xinjiang global geosciences transect (Quanshui-gou-Dushanzi)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 22(6): 534-540(in Chinese with English abstract).
- LIU Jia-qi. 2003. The boiling ground—Mud volcanoes[J]. Discovery Nature, 22(8): 8-9(in Chinese).
- MIZOBE K, WASEDA A, TANAKA K. 2007. Geochemical characteristics of natural gases from mud volcanoes in Tokamachi City, Niigata Prefecture[C]//Japan: Geoscience Union Meeting (abstract Y239-P011).
- PALLASSER R J. 2000. Recognising biodegradation in gas/oil accumulations through the $\delta^{13}\text{C}$ compositions of gas components[J]. Organic Geochemistry, 31(12): 1363-1373.
- PENG Xi-ling. 2007. A discussion on mud volcanoes in Xinjiang[J]. Western Prospecting Oil Gas, 25: 71-81(in Chinese).
- QIN Li-ming, ZHANG Zhi-huan, LI Wei, YANG Yong-cai, YUAN Dong-shan. 2008. The distribution and genetic mechanism of 25-Norhopane from the III block in central Junggar Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(4): 478-485(in Chinese with English abstract).
- WANG Dao, LI Mao-wei, LI Meng, DAI Xiao-min. 1997. A preliminary study on eruption of the mud volcano in Dushanzi, Xinjiang[J]. Seismology and Geology, 19(1): 14-16(in Chinese with English abstract).
- WANG Dao. 2000. Mud volcanoes and earthquakes in North Tianshan, Xinjiang[J]. Inland Earthquake, 14(4): 350-353(in Chinese with English abstract).
- WANG W C, ZHANG L Y, LIU W H, KANG Y, REN J H. 2005. Effects of biodegradation on the carbon isotopic composition of natural gas—a case study in the Bamianhe oil field of the Jiyang Depression, Eastern China[J]. Geochemical. Journal, 39(4): 301-309.
- WASEDA A, IWANO H. 2008. Characterization of natural gases in Japan based on molecular and carbon isotope compositions[J]. Geofluids, 8(4): 286-292.
- ZHENG G D, FU B H, TAKAHASHI Y, KUNO A, MATSUO M, ZHANG J D. 2010. Chemical speciation of redox sensitive elements during hydrocarbon leaching in the Junggar Basin, Northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 39(6): 713-723.