doi: 10.11720/wtyht.2017.3.09

杨志斌,周亚龙,孙忠军,等.羌塘盆地泥火山发育区天然气水合物地球化学勘查[J].物探与化探,2017,41(3):452-458.http://doi.org/10. 11720/wtyht.2017.3.09

Yang Z B, Zhou Y L, Sun Z J, et al. Geochemical exploration of natural gas hydrate in mud volcano area of the Qiangtang Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(3):452-458. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.09

羌塘盆地泥火山发育区天然气水合物地球化学勘查

杨志斌¹,周亚龙¹,孙忠军¹,张富贵¹,张舜尧¹,李广之²

(1.中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000;2.中国石化石油勘探开发研究院 合肥石油化探研究所,安徽 合肥 230022)

摘要: 泥火山是天然气水合物赋存的标志之一,是天然气水合物存在的主要证据。羌塘盆地冻土区发育大量泥火山。对泥火山发育区进行了地球化学勘查,结果表明,泥火山周围具有酸解烃、荧光光谱、碳酸盐、蚀变碳酸盐、微量元素等地球化学指标显著异常,甲烷碳同位素和三维荧光结果显示地球化学烃类异常为原油伴生气和凝析油成因,表明泥火山外围烃类富集是由油气藏渗漏形成。该结论对羌塘盆地天然气水合物勘查突破具有重要意义。 关键词: 泥火山;天然气水合物;地球化学勘查;羌塘盆地

中图分类号: P632 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2017)03-0452-07

0 引言

泥火山,是顶部带有漏斗状火山口并具有通向 深部的管孔,可涌出混有砾石、砂及泥质沉积物的 水、气的大小不一的圆锥形山丘或盆穴,它的形成与 烃类渗出物有密切关系^[1-3],通常认为泥火山是天 然气水合物赋存的标志之一,是天然气水合物存在 的活证据^[4]。国外先后在黑海、里海、地中海、挪威 海、巴巴多斯滨海地区、日本南海海槽、尼日利亚岸 外以及墨西哥湾等海区发现了与海底泥火山有关的 天然气水合物^[5-8],在我国南海及台湾南部,也均发 现了与天然气水合物有关的泥火山^[9-11]。泥火山天 然气水合物在坑口附近和丘状外围成藏,形成水合 物需要的气体是从泥火山中央扩散出去的溶解气 体^[12]。

海洋泥火山中央部位周围的天然气水合物的形成是由于流体的向上运移,这种包含了气体的流体的温度较周围沉积物的温度要高,可能还处于游离 气状态。当这种热流冷却导致气体溶解度降低时, 便形成了天然气水合物[13]。

地球化学方法是勘查天然气水合物的重要方法 之一,已在天然气水合物勘查中得到大量应 用^[14-17]。羌塘盆地发育大量泥火山^[18],地表主要为 第四系覆盖,有大片连续冻土区,介质比较均一,化 探指标影响因素少,进行地球化学勘查更具优势。

1 地质概况

研究区位于青藏高原腹地羌塘盆地中央隆起带 北缘戈木错地区(图1)。区域出露地层有上石炭 统一下二叠统展金组(C₂-P₁zh)、中二叠统鲁谷组 (P₂l)、上三叠统望湖岭组(T₃w)、上更新统冲洪积 (Qp³)、全新统冲积(Qh)。研究区第四系松散沉积 物是天然气水合物重要的储存场所,其次为展金组 变晶颗粒灰岩、石英片岩、变质石英砂(砾)岩等岩 性的孔隙和裂隙。区内褶皱不发育,断裂和断层发 育。研究区多年冻土类型分为大片连续多年冻土、 岛状融区多年冻土、岛状多年冻土,为天然气水合物 的形成提供了温压条件^[19-20]。

收稿日期: 2016-05-03

基金项目:中国地质调查局天然气水合物勘查与试采专项(GZHL20110303、GZH201400301)

作者简介: 杨志效数据4-),男,硕士,工程师,地球化学专业,主要从事天然气水合物勘查方法技术研究工作。Email:yangzhibin@igge.cn



图 1 羌塘盆地泥火山发育区位置

2 方法技术

地球化学勘查方法主要采用酸解烃法(SC)、碳酸盐法(XCO₃)、蚀变碳酸盐法(ΔC)、荧光光谱法和 微量元素法。地球化学勘查面积 60 km²,野外土壤 样品采集 30 cm 以下黏土层或砂土层,采样密度 4 个点/km²,采集土壤样品 240 件(图 2)。

分析测试由中国地质科学院地球物理地球化学 勘查研究所中心实验室和中国石化石油勘探开发研 究院勘查地球化学实验室完成,分析方法和检出限 依据《油气地球化学勘探试样测定方法》GB/T 29173-2012执行,分析质量合格。

3 地球化学异常特征

3.1 酸解烃异常

酸解烃是由于油气藏的垂直渗逸在地表经累积 吸附而引起的烃类浓度变化,通过地表烃类的异常 分布及形态特征能够预测地下油气藏的存在。甲烷 是酸解烃中分子量最小、最容易以气态迁移的分子, 它与其他酸解烃重烃指标存在相关关系,但又有自 身的地球化学特性,甲烷是烃类双扩散对流体系中 扩散作用最轻的指标。研究区酸解烃甲烷异常高值 分布在泥火山西侧,北东向推断断裂和东西向断裂 交汇处(图3)。

干燥系数为甲烷和重烃比值,反映烃类迁移分异 特征。研究区干燥系数异常高值范围比酸解烃甲烷 大,呈散点状分布(图4),表明烃类气体迁移过程中酸 解烃甲烷和重烃未发生分异,且较好的烃类运移通道 度得甲烷和重烃迁移到地表都形成了地球化学异常。



图 2 采样点位



图 3 土壤酸解烃甲烷地球化学异常



3.2 荧光光谱异常

荧光光谱指标主要反映二环、三环芳烃的地球 化学异常分异特征以及大分子物质的迁移特征,利 用其属性可以研究油气气源运移和聚集的规律。研 究区荧光光谱 F360 nm 异常主要分布在东西向断裂 以南(图 5),表明深部芳烃迁移受东西向断裂控制。



图 5 土壤荧光光谱 F360 nm 地球化学异常

3.3 碳酸盐和蚀变碳酸盐异常

土壤碳酸盐分布特征和酸解烃等相似,具有显 著相关关系(图 6),也是在断裂交汇处出现强异常 点,揭示土壤酸解烃含量受土壤碳酸盐含量的控制。

蚀变碳酸盐油气藏中的低分子烃类气体垂向运 移至近地表发生氧化作用,被分解成二氧化碳和水, 二氧化碳与沉积物中的某些盐类及水发生作用,生 成特殊碳酸盐,其热分解温度是 500~600 ℃,在泥 火山周围发育非常明显的高值异常(图 7)。 万方数据





3.4 微量元素异常

地下泥火山周围出现 Sr、U 等微量元素的高度 富集特征(图 8、图 9),其主要是深部油气藏中烃类 向上运移的微细气泡流将微量金属元素捕获,从而 携带这些元素以准气态和离子形式向上运移,迁移 至地表的伴生元素被土壤和沉积物层捕获。同时烃 类的长期微渗漏也能使地表地球化学环境改变,使 元素发生迁移或沉淀。这两种作用都能引起近地表 地球化学场发生变化,经过后期油气改造、叠加作用 的地区,在微量元素含量和组合关系上与周围背景 区有特征差异。

4 地球化学异常成因

4.1 甲烷稳定碳同位素

应用烃类气体的 $v(C_1)/[v(C_2)+v(C_3)]$ 值以



图 8 土壤 Sr 地球化学异常

及甲烷的碳同位素组成 $\delta^{13}C_1$ 可以有效地区分沉积 物中烃类成因。一般来说, $v(C_1)/[v(C_2)+v(C_3)]$ >1000、 $\delta^{13}C_1 < -60\%(PDB)$ 指示气体为微生物成 因; $v(C_1)/[v(C_2)+v(C_3)] < 1000$ 、 $\delta^{13}C_1 >$ -50‰(PDB)指示气体为热解成因;介于两者之间 表明为混合成因。研究区 $v(C_1)/[v(C_2)+v(C_3)]$ 比值均小于1000、 $\delta^{13}C_1$ 值均大于-50‰(PDB),指



图9 土壤 U 地球化学异常

示土壤酸解烃烃类气体为热解成因。

对异常区土壤样品中的 $\delta^{13}C_1$ 及烃类气体组分进行分析测试,图 10为浅表层土壤烃类异常区的 $v(C_1)/[v(C_2)+v(C_3)] 与 \delta^{13}C_1$ 交汇图,图版显示地球化学异常区土壤酸解烃类成因主要为原油伴生气和凝析油伴生气。



I¹—生物气; I²—生物气和亚生物气; I³—亚生物气; II¹—原油伴生气; II²—油型裂解气; II¹—油型裂解气和煤成气; II²—凝析油 伴生气; IV—煤成气; V¹—无机气; V²—无机气和煤成气

图 10 羌塘盆地泥火山异常区土壤酸解烃 v(C₁)/[v(C₂)+v(C₃)]-δ¹³C₁ 交汇

4.2 三维荧光图谱

三维荧光图谱的特征参数包括峰位置、峰强度 (F)、主峰陡度(K)和特征波长对之间的强度比值 (R)等。在三维全扫描荧光光谱图中,激发波长/发 射波长(265/322)附近为单环及其同系物的荧光光 谱峰(T₃),230/342及275/344附近为二环及其同 万方数据 系物的荧光光谱(*T*₁),(252~272)/(350~424)附近 为三环及其同系物荧光光谱峰(*T*₂)。

图 11 为戈木错区块泥火山口采集样品的三维 荧光图谱,荧光光谱也发育 3 个峰(T₁、T₂、T₃),T₁ 峰是油气的共性峰,代表单环芳烃及其同系物,T₂ 峰代表三环芳烃及其同系物,T₃峰代表二环及其同 系物,R 值偏高,K>0.7(表1),属于凝析油特征。



图 11 羌塘盆地泥火山异常区土壤三维荧光图谱

表1 羌塘盆地泥火山土壤三维荧光数值

| 样品编号 | T_{1} | F_1 | T_2 | F_{2} | T_3 | F_3 | R | Κ |
|--------|---------|-------|---------|---------|---------|-------|------|------|
| GX1312 | 228/340 | 107.0 | 248/375 | 5.2 | 264/320 | 18.0 | 20.6 | 0.84 |
| GX1313 | 228/340 | 123.0 | 248/375 | 10.3 | 264/320 | 26.0 | 11.9 | 0.83 |
| GX1415 | 228/340 | 64.0 | 248/375 | 5.3 | 264/320 | 12.5 | 12.1 | 0.79 |
| GX1512 | 228/340 | 70.0 | 248/375 | 4.9 | 264/320 | 12.5 | 14.3 | 0.83 |
| GX1513 | 228/340 | 75.0 | 248/375 | 7.3 | 264/320 | 15.0 | 10.3 | 0.81 |
| GX1611 | 228/340 | 66.0 | 248/375 | 7.0 | 264/320 | 12.5 | 9.4 | 0.82 |

注:荧光光谱指标含量单位为10-6

4.3 天然气水合物地球化学异常

根据青海祁连山天然气水合物发育区地球化学 试验结果,浅表土壤中烃类组分具有明显的地球化 学异常,研究表明异常气源主要来源于深部热解气 成因,地球化学勘查方法在该地区天然气水合物勘 探中的有效性已得到证实。羌塘盆地泥火山发育区 周围土壤烃类组分统计特征与青海祁连山水合物发 现区土壤烃类组分特征非常相似(表 2),其地球化 学异常模型特征也类似。

万方数据

5 泥火山外围天然气水合物形成条件及模式

首先,泥火山聚集区周围具有酸解烃、顶空轻 烃、碳酸盐、蚀变碳酸盐、荧光光谱、微量元素(Sr、 U)等地球化学高值异常,异常面积约2km²,具有很 强的烃类气体逸出痕迹,而在泥火山聚集带外围地 球化学异常较弱,与泥火山天然气水合物形成模式 中烃类运移方式相似。研究表明羌塘盆地南北拗陷 中分布有较厚的中生界烃源岩和储集层,而中央隆

| +1:+-: | | 羌塘泥火山周围 | | 青海发现水合物地区 | | | |
|--------|--------|---------|-------|-----------|------|-------|--|
| 了百个小 一 | 最大值 | 最小值 | 均值 | 最大值 | 最小值 | 均值 | |
| 甲烷 | 215.28 | 6.58 | 65.15 | 416.54 | 1.39 | 30.74 | |
| 乙烷 | 32.67 | 0.44 | 12.04 | 50.02 | 0.06 | 0.65 | |
| 乙烯 | 1.49 | 0.03 | 0.36 | 0.64 | 0.00 | 0.12 | |
| 丙烷 | 12.96 | 0.17 | 4.73 | 19.10 | 0.03 | 0.91 | |
| 丙烯 | 1.28 | 0.01 | 0.24 | 0.67 | 0.00 | 0.17 | |
| 正丁烷 | 2.64 | 0.03 | 0.64 | 6.73 | 0.00 | 0.35 | |
| 异丁烷 | 4.24 | 0.05 | 1.53 | 4.49 | 0.00 | 0.22 | |
| 正戊烷 | 3.25 | 0.01 | 0.46 | 2.38 | 0.00 | 0.13 | |
| 异戊烷 | 1.39 | 0.01 | 0.48 | 3.33 | 0.00 | 0.24 | |
| 蚀变碳酸盐 | 2.53 | 0.11 | 0.49 | 2.38 | 0.05 | 0.28 | |

表 2 土壤酸解烃类组分特征值对比

注:酸解烃单位为 µL/kg;蚀变碳酸盐单位为 10⁻²

起带以古生界老地层为主,且岩石变形变质比较强 烈,构造发育,并经历了低绿片岩相或更高的变质作 用改造,即使原烃源岩发育也早已过成熟,超过干气 阶段,所产生的天然气可能已经散失。地质调查认 为中央隆起带上的气源以拗陷中气体运移而来为 主。本次地球化学调查结果显示,该地区地表吸附 烃类含量相对较低,而且游离烃也无明显的异常,证 实区块内烃原岩产生的烃类气体已经散失。沿大沙 河断裂和北部 NE 向断裂构造发育地区发现地球化 学异常带,推断为烃类气体运移导致地表富集,从而 产生地球化学异常。

其次,区内地形相对比较平缓,地下水十分发 育,地下水的出露点往往形成冰椎或冻胀丘。地表 草皮发育,岩层破碎,雨、雪水容易下渗,多年冻土以 第四系松散沉积物为主,孔隙发育,地下水渗透范围 和渗透深度较大,多年冻土呈大片连续分布,冻土厚度大于100m。

另外,研究区断裂和断层发育,断裂活动时间 长、规模大、方向性强。断裂和断层之间相互叠加、 改造构成较为复杂的构造格局。研究区主要发育 EW 和 NE 向两组断层和断裂,它们控制地层和岩性 的分布,为天然气水合物烃类运移提供通道。

根据戈木错地区泥火山特征和天然气水合物赋 存条件,建立陆域泥火山发育地区天然气水合物形 成模式(图 12)。渗漏烃类气体沿泥火山烟囱运移 过程中向周围冻土区扩散,在温压条件和冻土条件 适宜的层位形成天然气水合物矿藏。后期受气温构 造等条件影响,部分烃类气体和水合物分解产生的 气体沿裂隙向地表迁移,在地表土壤中形成地球化 学顶部异常。



6 结论

差塘盆地泥火山发育区具有明显的地球化学异 常,异常气源为凝析油伴生气和原油伴生气成因,是 由深部油气渗漏形成。渗漏烃类气体从底部深处沿 断层以及油气藏顶部的气烟筒等通道运移进入到有 利储藏区聚集形成天然气水合物,未固结的烃类气 体和因温压条件导致天然气水合物分解产生的气体 迁移到地表形成地球化学异常,结合发育冻土、构 造、气源条件,该地区可能存在天然气水合物矿藏, 并提出陆域泥火山周围天然气水合物形成模式。

参考文献:

- Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. Marine Geology, 2000, 167(12): 29 - 42.
- [2] Judd A, Hovland M. Seabed Fluid Flow: The impact on geology, biology and the marine environment [M]. Cambridge: Cambridge University, 2007.
- [3] 何家雄,祝有海,翁荣南,等.南海北部边缘盆地泥底辟及泥火 山特征及其与油气运聚关系[J].地球科学:中国地质大学学 报,2010,35(1):75-86.
- [4] 沙志彬,张光学,梁金强,等.泥火山——天然气水合物存在的 活证据[J].南海地质研究,2005(1):48-56.
- [5] Dimitrov L. Mud volcanoes-the most important pathway for degassing deeply buried sediments [J]. Earth-Science Reviews, 2002, 59(1):49-76.
- [6] Dimitrov L. Mud volcanoes: A significant source of atmospheric Methane[J]. Geo Marine Letters, 2003, 23(3/4):155-161.
- [7] Kopf A J. Significance of mud volcanism. Reviews of Geophysics, 2002, 40(2):2.1-2.52.
- [8] Milkov A V. Global distribution of mud volcanoes and their signifi-

cance in petroleum exploration as a source of methane in the atmosphere and hydrosphere and as a geohazard [C]//Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity, 2005, 51: 29-34.

- [9] Chiu J K, Tseng W H, Liu C S. Distribution of gassy sediments and mud volcanoes offshore southwestern Taiwan [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2006,17(4):703-722.
- [10] 刘伯然,宋海斌,关永贤,等.南海东北部陆坡冷泉系统的浅地 层剖面特征与分析[J].地球物理学报,2015,58(1):247-256.
- [11] 陈江欣,关永贤,宋海斌,等.麻坑、泥火山在南海北部与西部陆缘的分布特征和地质意义[J].地球物理学报,2015,58(3):919-938.
- [12] Konyukhov A I, Ivanov M K, Kul'nitsky L M. On mud volcanoes and gas hydrates in deep water regions of the Black Sea[M]. Russian: Litol.Polezn.Iskop,1990,3:12-23.
- [13] Bil K J. Economic perspective of methane from hydrate [G]//Max MD. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2000:349 - 360.
- [14] Sun Z J, Yang Z B, Mei H, et al. Geochemical characteristics of the shallow soil above the Muli gas hydrate reservoir in the permafrost region of the Qilian Mountains [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139:160 - 169.
- [15] 卢振权,吴必豪,饶竹,等,青藏铁路沿线多年冻土区天然气水 合物的地质、地球化学异常[J].地质通报,2007,26(8):1029-1040.
- [16] 杨志斌,孙忠军.天然气水合物地球化学勘查方法[J].物探与 化探,2011,35(3):285-289.
- [17] 孙忠军,杨志斌,卢振权,等.青海木里三露天天然气水合物矿 藏土壤微量元素地球化学特征[J].现代地质,2015,29(5): 1164-1172.
- [18] 谢超明,李才,李林庆,等.藏北羌塘中部首次发现泥火山[J]. 地质通报, 2009,28(9):1319-1324.
- [19] 羌塘盆地戈木错地区泥火山群沉积及浅表地球化学特征[J]. 沉积与特提斯地质,2015,35(1):50-56.
- [20] 解超明,李才,吴彦旺,等.青藏高原羌塘中部泥火山喷发物中 沥青脉饱和烃气相色谱特征及其油气地质意义[J].地质通 报,2012,31(6):977-978.

Geochemical exploration of natural gas hydrate in mud volcano area of the Qiangtang Basin

YANG Zhi-Bin¹, ZHOU Ya-Long¹, SUN Zhong-Jun¹, ZHANG Fu-Gui¹, ZHANG Shun-Yao¹, LI Guang-Zhi² (1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 2. Hefei Geochemical Exploration Institute, Research Institute of Exploration and Development, Sinopec, Hefei 230022, China)

Abstract: Mud volcano is one of the signs of gas hydrate, and it is the main evidence for the existence of natural gas hydrate. The permafrost area in Qiangtang basin has developed a lot of mud volcanoes, the geochemical exploration of mud volcanoes shows that acidolysis hydrocarbon and fluorescence spectra, carbonate, altered carbonate and trace elements geochemical indices are abnormal in mud volcanoes, and methane carbon isotope and three-dimensional fluorescence analytical results show that hydrocarbon geochemical anomalies of crude oil are genetically related to associated gas and condensate oil formation, and that the peripheral area of mud volcano exhibits hydrocarbon enrichment, formed by the leakage of oil and gas reservoir. The results obtained by the authors are of important significance for gas hydrate exploration breakthrough in Qiangtang basin.

Key words: mud volcanoes; natural gas hydrate; geochemical exploration; Qiangtang Basin