

木里冻土带天然气水合物赋存区 浅层土壤地球化学特征及指示意义

邢学文¹, 刘松¹, 周红英¹, 邹立群¹, 李广之², 高伟²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083 2. 中国石化集团资产经营管理有限公司 合肥培训测试中心, 安徽 合肥 230022)

摘要:青海省祁连山木里是中国陆上唯一通过钻探发现天然气水合物样品的地区。在木里天然气水合物赋存区开展了土壤油气化探的研究工作, 采用了顶空气、酸解烃和蚀变碳酸盐3种烃类检测技术, 其中顶空气和酸解烃方法在木里冻土带比较有效, 而蚀变碳酸盐方法相对较差。顶空气法提取的游离烃和酸解烃法提取的吸附烃显示: 木里天然气水合物赋存区土壤中烃类气体组分复杂, 除了主要成分甲烷外, 还含有少量乙烷、丙烷、丁烷和戊烷。烃类气体既有热解成因, 又有生物成因; 气体类型包括油型气、煤成气和生物气。根据甲烷衬度异常图, 结合研究区地质资料和发现天然气水合物的钻井资料, 认为工区中东部的甲烷高异常区断裂发育, 应该是天然气水合物的有利赋存区。

关键词:永久冻土带; 土壤地球化学; 天然气水合物; 青海木里

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical behaviors of shallow soil in Muli permafrost and their significance as gas hydrate indicators

Xing Xuewen¹, Liu Song¹, Zhou Hongying¹, Zou Liqun¹, Li Guangzhi², Gao Wei²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. Hefei Training and Testing Center of Assets Management Ltd. of China Petrochemical Corporation, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract: Muli, the only gas hydrate hosting area in China proved by core sampling, is located in Qilian Mountain permafrost area. Petroleum geochemical exploration was carried out with three hydrocarbon detection techniques (HS, acidolysis hydrocarbon and altered carbonate survey methods) in the area. The results show that the former two methods are more effective than the latter one. Analysis of free hydrocarbons extracted through HS and absorbed hydrocarbons from acidolysis indicates that the components of hydrocarbon gas in soil of areas containing gas hydrate in Muli are complex. In addition to the major component of methane, there are also small amount of ethane, propane, butane and pentane. There are both hydrocarbon gas of pyrolytic origin and that of microbiogenic genesis. The hydrocarbon gas can be classified as oil-prone gas, coal-driven gas and biogas. Methane contrast diagram in combination with the geologic background and core samples in wells discovering gas hydrate reveal that its eastern-central part with well-developed faults and high methane anomaly may be a favorable target for gas hydrate exploration.

Key words: permafrost; soil geochemistry; gas hydrate; Muli area in Qinghai province

天然气水合物是水分子和甲烷等气体分子在低温 ($<10\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高压 (3~5 MPa)、气体浓度大于其溶解度条件下形成的一种具有笼状结构的结晶化合物, 是一种洁净无污染的新型能源。由于赋存环境比较特殊, 目前发现的天然气水合物主要位于水深大于 300 m 的海底沉积物和地面 130 m 以下的多年冻土带中。1967 年, 前苏联在西伯利亚冻土带的麦索亚哈油气田区首次发现天然产出的天然气水合物^[1], 之后美国、加拿大也相继在阿拉斯加、马更些三角洲等陆上冻土区发现了天然气水

合物^[2-3]。2008 年, 我国在青海祁连山山地冻土带的木里地区也首次钻获了天然气水合物样品^[4]。

天然气水合物的勘查方法主要有地质、地球物理、地球化学以及钻探等手段, 其中地球物理中的似海底反射 (BSR) 技术是目前最为有效的方法。然而也有研究表明, BSR 代表了天然气水合物下方甲烷气泡的存在, 并非天然气水合物的直接指示, 许多采集到天然气水合物的地方没有出现 BSR, 而出现 BSR 的地方不一定存在天然气水合物^[5]。另外, 冻土带冰胶结永冻层

收稿日期: 2012-09-03; 修订日期: 2014-01-10。

第一作者简介: 邢学文 (1976—), 男, 博士、高级工程师, 遥感。E-mail: x5505@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项 (2011ZX05020-008)。

的地震波传播速度与天然气水合物层的相当,BSR 技术不适合用于永久冻土区的气体水合物勘查^[6]。因此,冻土带天然气水合物勘查还需要加强地球化学等其他方法的研究。

文中主要介绍在木里天然气水合物赋存区,浅层土壤中不同赋存状态烃类物质的组分、丰度特征以及成因类型和气体性质,结合地质资料和已知天然气水合物发现井,研究浅层土壤烃类物质对深部天然气水合物的指示作用。

1 地质概况

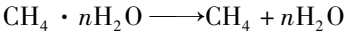
研究区位于发现天然气水合物的木里煤田聚乎更矿区,大地构造位置位于加里东构造运动期所形成的中祁连陆块西段,盆地区划上处于南祁连盆地的木里坳陷西端(图 1),木里坳陷是南祁连盆地中最具油气勘探前景的地区,存在 4 套质量良好的烃源岩,基本上处于成熟—高成熟阶段,储层发育,存在有利的生储盖组合^[7]。除第四系外,研究区地层主要包括侏罗系江仓组(J_{2j})和木里组(J_{2m}),它们均含多个可采煤层。侏罗系含煤地层沉积于三叠系为基底的坳陷中,由于构造作用影响,矿区中部为三叠系组成的一个背斜,南北两侧为侏罗系含煤地层组成的两个向斜,发现天然气水合物的 3 口钻井(DK1,DK2 和 DK3)位于南向斜的翼部。天然气水合物主要赋存于中侏罗统的江仓组,以薄层状、片状、团块状赋存于粉砂岩、泥岩的裂隙面中或者以浸染状赋存于细粉砂岩的孔隙中^[8]。

2 地球化学特征

天然气水合物的形成和分解,会使其周围沉积物富含烃类气体。地质学家提出的天然气水合物形成演

化模式,都认为水合物成藏过程中伴有烃类游离气的微渗漏和运移的动态过程^[9]。

天然气水合物分解释放出水和甲烷气体:



其中的甲烷有游离态存在于沉积物、吸附态存在于沉积物、氧化态存在于成岩矿物中(如特殊碳酸盐)3 种存在方式^[10]。

针对甲烷的 3 种赋存方式,分别选择了顶空气、酸解烃和蚀变碳酸盐 3 种检测方法。前两种方法检测的是 C₁—C₅ 的轻烃组分,包括甲烷(C₁)、乙烷(C₂)、乙烯(C₂⁻)、丙烷(C₃)、丙烯(C₃⁻)、异丁烷(iC₄)、正丁烷(nC₄)、异戊烷(iC₅)和正戊烷(nC₅)9 个指标;第三种方法检测的是蚀变碳酸盐分解释放 CO₂ 的百分含量。

2.1 顶空气地球化学特征

木里地区的顶空气土壤样品,均能检测出甲烷、乙烷,大部分样品可以检测到乙烯、丙烷和丙烯,部分样品还可以检测到异丁烷、正丁烷、异戊烷和正戊烷(表 1)。为了了解顶空气轻烃 C₁—C₅ 分布的总体特征,绘制了以 C₁, C₂ + C₃, C₄ + C₅ 为指标的三角图(图 2)。从图上可以看出,绝大部分样品位于三角图的右下角,C₁ 所占比例非常高,大部分样品的 C₁ 含量都在 98% 以上,C₂ + C₃ 含量大于 C₄ + C₅,而 C₄ + C₅ 含量大多数为 0。另外,从样品在图上的分布来看,离散度较大,说明研究区土壤中的游离烃可能具有多源特征。

各类烃含量的平均值表现为 C₁ ≫ C₂ > C₃ > C₅ > C₄。甲烷体积含量为 0.36 ~ 5 530.37 μL/L,平均值 463.69 μL/L;乙烷体积含量为 0 ~ 1.77 μL/L,平均值 0.38 μL/L;丙烷体积含量为 0 ~ 1.58 μL/L,平均值 0.4 μL/L。顶空气甲烷含量的均值是乙烷均值的 1 220 倍,是丙烷均值的 1 159 倍,甲烷含量是远远大于乙烷和丙烷,显示土壤游离烃中,甲烷可能有多种来源。

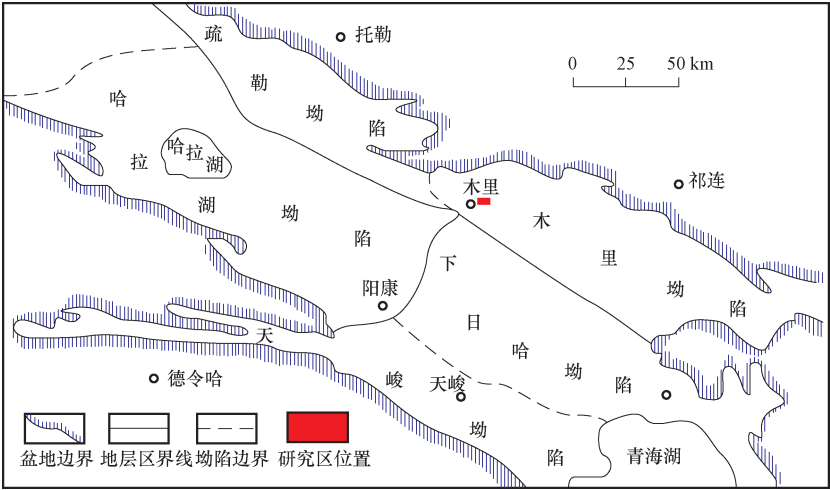


图 1 研究区位置示意图
Fig. 1 Location of the study area

表 1 顶空气不同指标统计特征

Table 1 Statistics of various indexes of hydrocarbon gas detected with headspace gas technique in the study area						
测试指标	可检样数/个	含量均值/%	含量最小值/%	含量最大值/%	标准离差	变异系数
甲烷	170	463.69	0.36	5 530.37	1 007.00	2.17
乙烷	170	0.38	0.01	1.77	0.30	0.79
乙烯	162	0.43	0	2.29	0.34	0.81
丙烷	114	0.27	0	1.58	0.33	1.23
丙烯	97	0.21	0	1.35	0.25	1.20
异丁烷	48	0.05	0	0.61	0.11	2.17
正丁烷	44	0.05	0	0.63	0.12	2.21
异戊烷	15	0.03	0	1.06	0.12	4.10
正戊烷	30	0.08	0	1.17	0.21	2.48
重烃	170	0.86	0.01	4.60	0.86	0.98
总烃	170	464.56	0.37	5 531.89	1 007.41	2.17

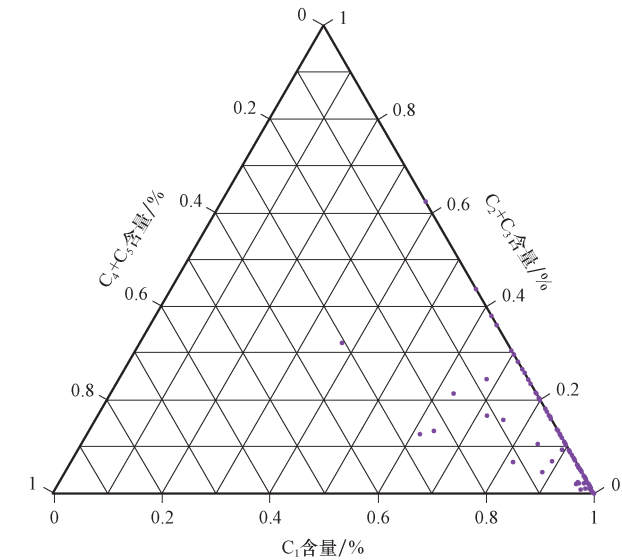


图 2 顶空气 C₁, C₂ + C₃, C₄ + C₅ 三角图
Fig. 2 Triangle plot of C₁, C₂ + C₃ and C₄ + C₅ of headspace gas in the study area

变异系数近似地代表了地球化学场的不均匀程度^[11],变异系数越大,越可能成矿。研究区除了顶空

气乙烷、乙烯和重烃的变异系数小于 1 属于均匀场外,其他轻烃指标变异系数都大于 1,为非均匀场,特别是顶空气甲烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷和总烃的变异系数都大于 2,为高度非均匀场。这一结果说明,该区存在烃类富集。对顶空气轻烃的几个指标做相关性分析,顶空气甲烷与顶空气其他几个指标均不相关,有些还呈负相关(表 2),显示了它们的成因相差较大,这说明土壤游离烃中的甲烷可能有不同的来源。

2.2 酸解烃地球化学特征

木里地区的酸解烃土壤样品,均可检测出甲烷、乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、异丁烷、正丁烷、异戊烷和正戊烷。为了了解土壤酸解轻烃 C₁—C₅ 分布的差异性和共同性,绘制了以 C₁, C₂ + C₃, C₄ + C₅ 为指标的三角图(图 3)。从图上可以看出,所有样品都位于右下角,C₁ 所占比例非常高,大部分采样点的 C₁ 含量都在 90% 以上,C₂ + C₃ 含量大于 C₄ + C₅,而 C₄ + C₅ 含量则很小。另外,样品分布较为集中,暗示研究区的吸附烃可能具有同源的特征。

表 2 顶空气轻烃指标相关性

Table 2 Correlation matrix of light hydrocarbons detected with headspace gas technique in the study area											
测试指标	甲烷	乙烷	乙烯	丙烷	丙烯	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	重烃	总烃
甲烷	1.00										
乙烷	0.31	1.00									
乙烯	-0.10	-0.06	1.00								
丙烷	0.17	0.43	0.59	1.00							
丙烯	0.12	0.22	0.73	0.88	1.00						
异丁烷	0.37	0.37	0.45	0.53	0.79	1.00					
正丁烷	-0.15	0.32	0.67	0.85	0.94	0.70	1.00				
异戊烷	-0.30	-0.23	0.65	0.38	0.75	0.68	0.75	1.00			
正戊烷	-0.29	0.26	0.86	0.61	0.55	0.20	0.63	0.37	1.00		
重烃	-0.02	0.36	0.77	0.89	0.96	0.72	0.98	0.70	0.72	1.00	
总烃	1.00	0.31	-0.10	0.17	0.12	0.37	-0.15	-0.30	-0.29	-0.02	1.00

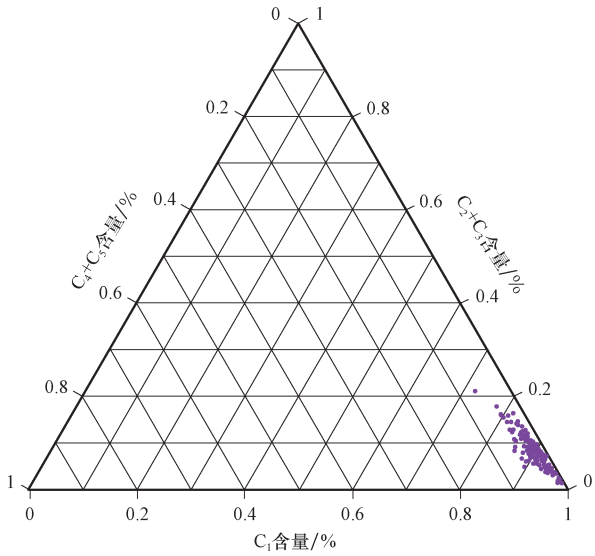


图3 酸解烃数据 C_1 , $C_2 + C_3$, $C_4 + C_5$ 三角图

Fig. 3 Triangle plot of C_1 , $C_2 + C_3$ and $C_4 + C_5$ detected with acidolysis technique in the study area

各类烃含量的平均值表现为 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4 > C_5$ 的递减规律(表3)。据实践经验,深部热成因迁移至地表的烃气,其组分之间呈 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4 > C_5$ 的变化规律^[12],显示研究区土壤吸附烃有可能是来至于深部的热解气。从变异系数上来看,吸附烃各组分都

大于2,属于高度非均匀地球化学场,说明烃类组分进入土壤晶体的时期可能发生过地质扰动事件造成烃类的不均匀分布。

从酸解烃可检数来看,土壤吸附烃的气体来源差异较小,另外根据酸解烃指标相关性分析(表4),酸解烃各组分间呈高度相关性,甲烷与乙烷、甲烷与丙烷及乙烷与丙烷的相关系数分别为0.99,0.98和0.99,甲烷与重烃的相关性也高达0.99,反映出该区土壤的吸附烃具有同源特征。

2.3 蚀变碳酸盐地球化学特征

根据目前海域天然气水合物的资料,几乎所有天然气水合物产出的地方均发现有自生碳酸盐矿物的存在^[13],说明这些自生碳酸盐矿物的形成一定程度上受天然气水合物形成或分解的控制。

木里土壤样品, ΔC 的测量值位于0.11%~4.65%,平均值为0.43%,标准偏差是0.41,变异系数为0.96。对比全国 ΔC 指标(全国平均为0.936%,标准偏差为0.73),该区浅表层沉积物中这种特殊蚀变碳酸盐含量较低,与一般陆上油气田所测的 ΔC 差别较大。另外,根据变异系数,该区蚀变碳酸盐指标属于均匀地球化学场,说明在木里冻土带,地表土

表3 酸解烃不同指标统计特征

Table 3 Indicatrix of hydrocarbon gas with acidolysis hydrocarbon method in the study area

测试指标	可检样数/个	含量均值/%	含量最小值/%	含量最大值/%	标准离差	变异系数
甲烷	170	57.28	1.173 1	1 575.62	180.39	3.15
乙烷	170	4.76	0.120 5	134.63	15.27	3.21
乙烯	170	1.05	0.020 0	18.38	2.15	2.05
丙烷	170	1.73	0.036 7	45.26	5.41	3.13
丙烯	170	0.77	0.020 2	9.31	1.58	2.04
异丁烷	170	0.34	0.001 7	10.63	1.20	3.57
正丁烷	170	0.59	0.010 0	17.01	1.93	3.29
异戊烷	170	0.24	0.002 1	7.08	0.81	3.33
正戊烷	170	0.24	0.006 5	5.77	0.66	2.75
重烃	170	7.89	0.204 1	217.50	25.16	3.19
总烃	170	65.18	1.377 3	1 774.04	205.33	3.15

表4 酸解轻烃指标相关性

Table 4 Correlation matrix of light hydrocarbons detected with acidolysis method in the study area

测试指标	甲烷	乙烷	乙烯	丙烷	丙烯	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	重烃	总烃
甲烷	1.00										
乙烷	0.99	1.00									
乙烯	0.26	0.28	1.00								
丙烷	0.98	0.99	0.39	1.00							
丙烯	0.31	0.33	0.96	0.44	1.00						
异丁烷	0.99	0.99	0.27	0.99	0.32	1.00					
正丁烷	0.97	0.97	0.41	0.99	0.47	0.98	1.00				
异戊烷	0.98	0.99	0.32	0.99	0.38	1.00	0.99	1.00			
正戊烷	0.97	0.96	0.39	0.98	0.45	0.98	0.99	0.99	1.00		
重烃	0.99	1.00	0.32	1.00	0.37	1.00	0.98	0.99	0.98	1.00	
总烃	1.00	0.99	0.27	0.98	0.32	0.99	0.98	0.98	0.97	0.99	1.00

壤中的蚀变碳酸盐对于深部天然气水合物的指示性较差。

3 木里天然气水合物成因和性质

3.1 烃类气体成因

天然气水合物气源成因通常是利用甲烷碳同位素来确定,除此之外,还可以借鉴油气勘探中的甲烷干燥系数、烃类湿度指数等方法判别甲烷成因。一般情况下,甲烷干燥系数(M)的计算方法采用体积比,即 $M = V_{C_1}/V_{C_{1-5}}$; $M < 99\%$ 时指示热解成因, $M > 99\%$ 时指示生物成因。烃类湿度比值用 $K = V_{C_1}/V_{C_2+C_3}$ 表示, $K < 100$ 时指示热解成因, $K > 100$ 时指示生物成因。另外国外水合物研究结果认为,可以把烃类湿度比值小于 100 视为指示典型热解成因,介于 100 ~ 1 000 视为指示混合成因,大于 1 000 视为指示典型微生物成因^[13]。

图 4 是研究区轻烃在甲烷干燥系数-烃类湿度比分类图上的投影。从图上可以看出,顶空气样品分为两个区,一部分是热解成因,一部分是微生物成因;而酸解烃样品则主要为热解成因。这与两种方法检测的不同赋存形式的烃类有关。酸解烃是检测土壤中生成碳酸盐矿物时包裹的轻烃,而顶空气则除了土壤颗粒之间的游离烃类,不仅有深部运移上来的轻烃,还包括了微生物形成的轻烃。另外,虽然采样时间是两个时期(5 月份和 9 月份),但总的成因类型,不受采样时间的影响。在对比发现天然气水合物的 DK2 钻井岩心的轻烃,主要为热解成因气体,另外有 3 个样品为微生物

成因,根据国外成因分类,这 3 个样品可以归为混合成因,这与黄霞等利用甲烷碳同位素与分子比 $C_1/(C_2 + C_3)$ 投点的结果一致^[8]。

3.2 烃类气体性质

储层含油气性质是指储层中含的是油还是气,是什么性质的油,是什么类型的气等等。主要依据轻烃色谱分析数据,运用烃类丰度及其结构组成判别法、轻烃比参数及轻烃组成图解法等进行判别预测。

漆富成对前苏联、德国、美国及中国 12 个油气田产地大量的酸解烃特征参数 $C_1/\Sigma C$ 和 C_1/C_{2+} 进行统计整理,结果表明,生物成因气以最高的 $C_1/\Sigma C$ (0.99 ~ 1) 和 C_1/C_{2+} 值(>100)区别于油型气和煤成气,煤成气以较高的 $C_1/\Sigma C$ 值(0.90 ~ 0.99)和 C_1/C_{2+} 值(>10)区别于油型气,而油型气 $C_1/\Sigma C$ 值(0.70 ~ 0.98)和 C_1/C_{2+} 值(>2)较低^[14]。据此,分别将研究区所有样品的顶空气和酸解烃结果投入该分类图(图 5)。从图可以看出,顶空气方法得到的游离烃具有多种类型,包括油型气、煤成气和生物气。而酸解烃方法得到的吸附烃,则主要为油型气,以及与煤成气的混合气。对比 DK2 钻孔岩心样品的投点图,顶空气方法得到的游离烃,更能指示深部水合物的成因。

4 木里天然气水合物前景评价

木里水合物赋存区不仅是一个含煤盆地,又是最具勘探前景的含油气盆地,甲烷等烃类物质丰富,具有

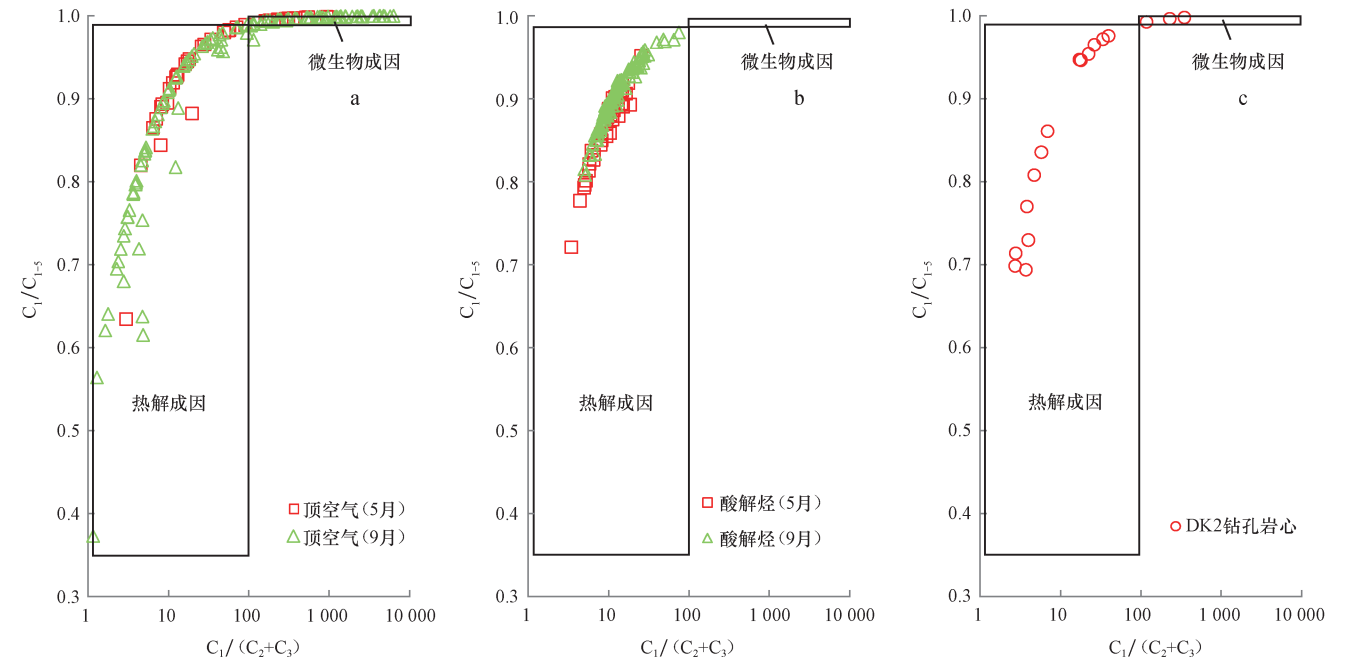


图 4 土壤顶空气(a)、土壤酸解烃(b)和 DK2 钻孔岩心提取轻烃(c)的 C_1/C_{1-5} 与 $C_1/(C_2 + C_3)$ 投点图

Fig. 4 Point diagram of C_1/C_{1-5} and $C_1/(C_2 + C_3)$ from light hydrocarbons detected with HS(a) and acidolysis analysis(b) techniques and extracted from cores of DK2 borehole(c) in Muli area

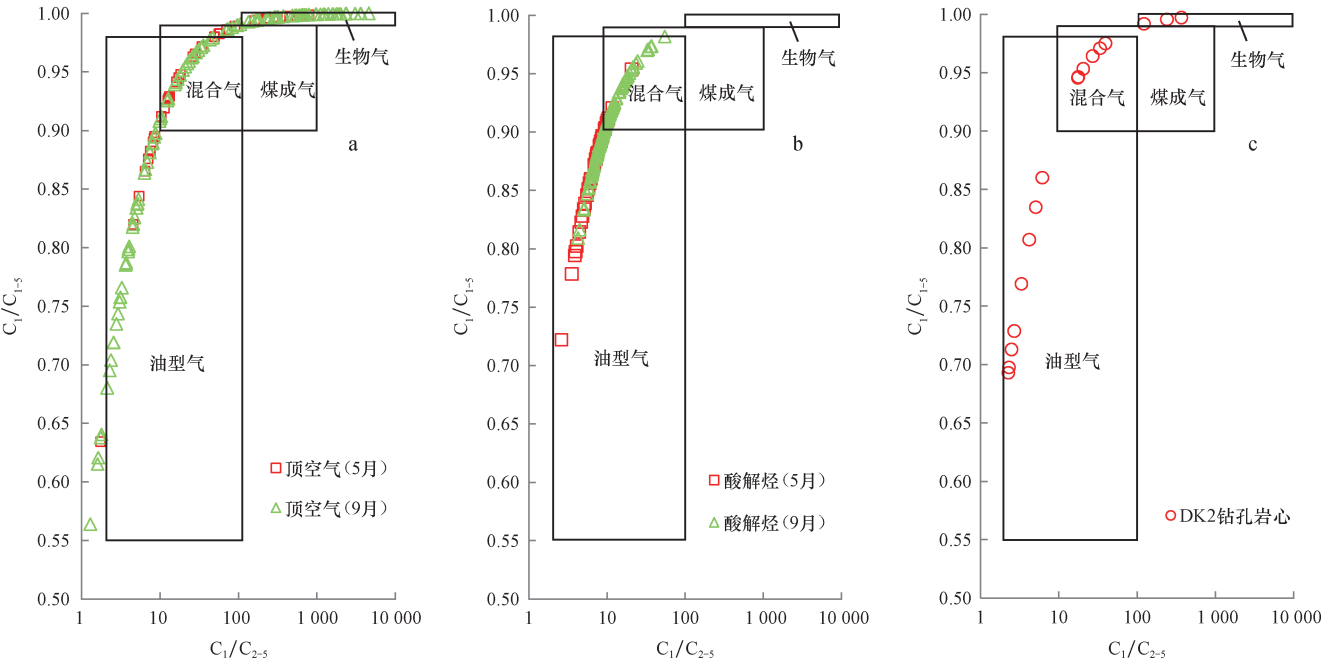


图 5 土壤顶空气(a)、土壤酸解烃(b)和 DK2 钻孔岩心提取轻烃(c)的 C_1/C_{1-5} 与 C_1/C_{2-5} 投点图

Fig. 5 Point diagram of C_1/C_{1-5} and C_1/C_{2-5} from light hydrocarbons detected with HS(a) and acidolysis analysis(b) techniques and extracted from cores of DK2 borehole(c) in Muli area

较好的天然气水合物勘探前景。目前,除了距离较近的 DK1,DK2,DK3,DK7 和 DK8 五个钻孔发现水合物外,其他较远的 DK4,DK5 和 DK6 三个钻孔只是发现一些少量气体喷溢或岩石表面见微量 - 少量气泡等异常现象^[15],需要其他技术手段指导进一步的勘探工作。

为了解浅层土壤地球化学方法对于深部天然气水合物的指示作用,分别制作了化探工区顶空气甲烷和酸解烃甲烷异常图。鉴于土壤样品是 5 月和 9 月不同时间采集的,存在地表土壤冻融等因素引起的差异,这

里采用衬度来表征甲烷异常在平面上的分布。衬度 = 甲烷含量/甲烷含量均值。顶空气甲烷衬度异常图和酸解烃甲烷衬度异常图分别如图 6 和图 7 所示。

顶空气方法得到的是游离烃,包含了多种成因气体,可以比较全面的反映研究区烃类物源的情况,游离烃处于土壤颗粒间,不受沉积物影响,空间活动性强,一定程度上可以指示深部天然气水合物的气源情况。根据木里土壤顶空气甲烷衬度异常图(图 6),顶空气甲烷异常与断裂相关性较好,异常沿断裂北东向展布,

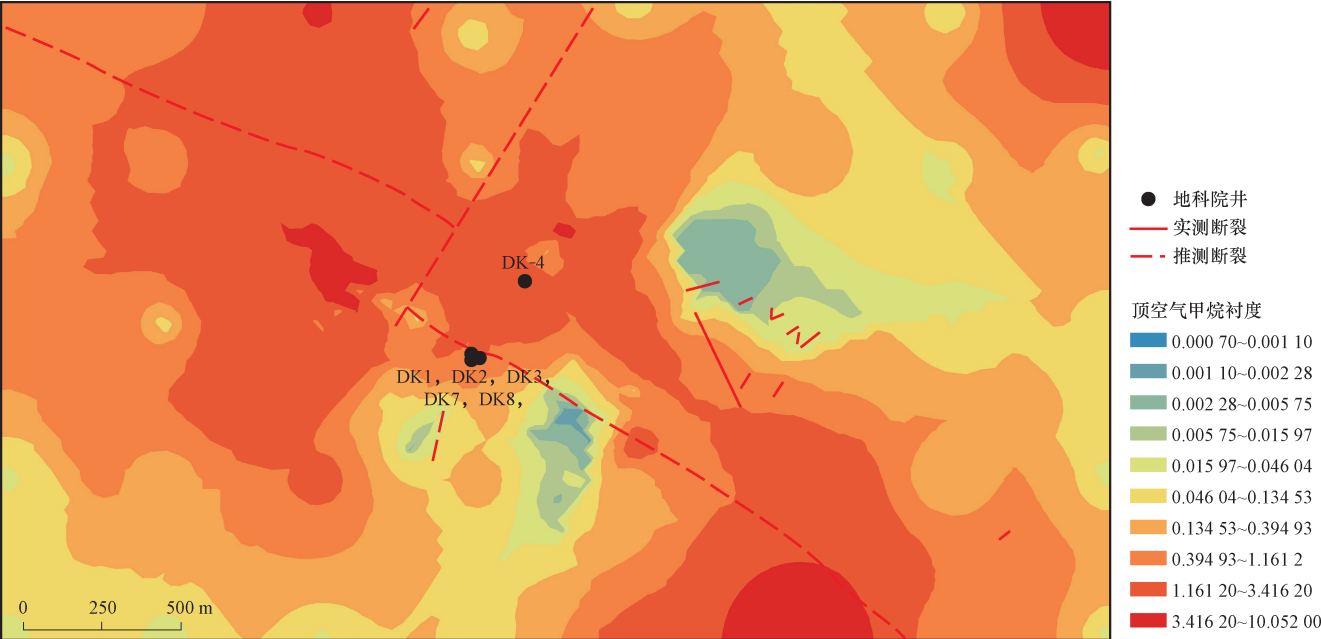


图 6 木里土壤顶空气甲烷衬度异常图

Fig. 6 Methane contrast anomalies based on headspace analysis in the study area

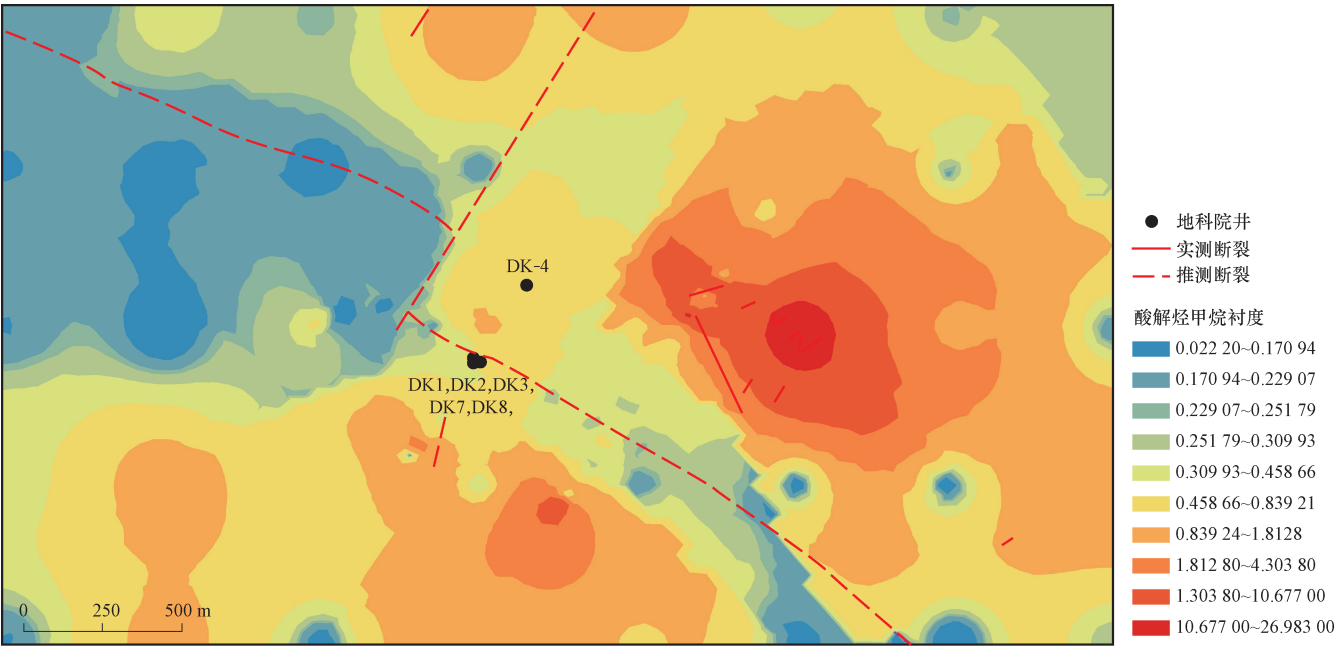


图 7 木里土壤酸解烃甲烷衬度异常图

Fig. 7 Methane contrast anomalies based on acidolysis analysis in the study area

高值区主要位于推测断裂的交汇区域,发现天然气水合物的钻井位于高值区边缘。

酸解烃方法得到的是吸附气,是成岩成矿时期进入土壤晶体中的气体,主要处于矿物晶格中,活动性较弱,虽然不能反映深部烃类的现状,但可以反映部分深部气源的分布特征。根据前面成因分析,木里土壤吸附烃主要是反映热解成因气体的富集情况。根据木里土壤酸解烃甲烷衬度异常图(图 7),酸解烃甲烷与推测断裂相关性较差,推测断裂附近、推测断裂交汇部位,均为低值区,发现天然气水合物的钻井,位于低值区附近。但在研究区东部实测断裂附近,酸解烃甲烷

表现为高异常值,可以认为是深部热解气沿着实测断裂这一优势通道到达浅层土壤中形成的。

游离烃和吸附烃是烃类在土壤中的不同赋存形式,单一用游离烃或者吸附烃,不能全面反映工区烃类的富集体征,必须组合起来才能用于研究区天然气水合物的评价。由于顶空气甲烷和酸解烃甲烷的单位不同,分别为 $\mu\text{L/L}$ 和 $\mu\text{L/kg}$,组合前需要先进行无量纲处理。前面的衬度方法已经实现了数据的无量纲化,这里直接把顶空气甲烷和酸解烃甲烷的衬度值相加,作为指示工区土壤甲烷异常的综合指标。

木里工区土壤甲烷综合异常如图 8 所示,高异常

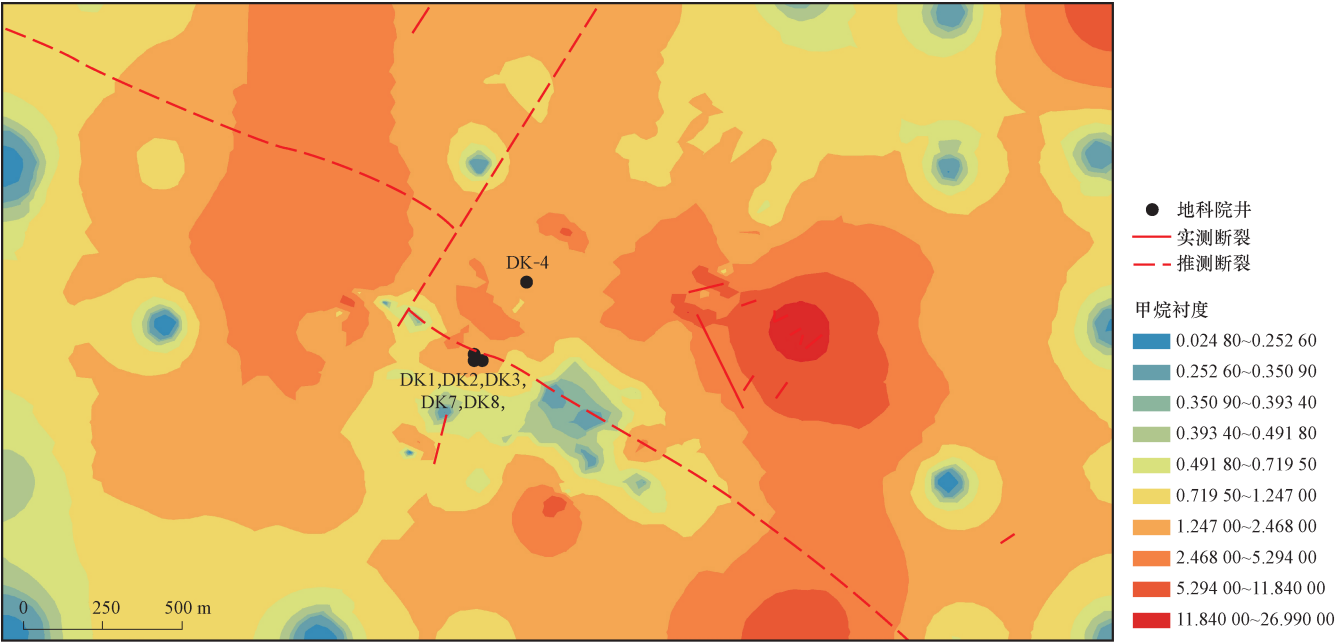


图 8 木里土壤甲烷衬度异常图

Fig. 8 Methane contrast anomalies of the study area

区位于工区东部实测断裂区,发现天然气水合物样品的钻孔(DK1,DK2,DK3,DK7 和 DK8)位于中高异常区,推测附近存在断裂,仅发现天然气水合物异常的钻孔(DK4)位于中高异常区,与断裂相距较远。根据庞守吉等对研究区钻孔的研究,木里天然气水合物和断裂、构造破碎带关系密切^[15]。因而,研究区天然气水合物评价,除了关注高异常区外,还要关注断裂发育的区域。根据木里土壤甲烷衬度异常图,研究区异常面积较大,东部实测断裂分布区域,应该是天然气水合物最有利的赋存区域,另外,中高异常区内的断裂发育部位,也应该是天然气水合物的潜在赋存区。

5 结论

- 1) 木里采用的三种油气化探方法中,顶空气对于冻土带深部天然气水合物的指示效果最好,酸解烃较好,蚀变碳酸盐最差。
- 2) 木里烃类气体成因不仅有热解成因,还有生物成因;烃类气体类型包括油型气、煤型气和生物气。
- 3) 顶空气法提取的游离烃和酸解烃法提取的吸附烃,都是深部气源在地表的反映,游离烃是多种烃源的反映,酸解烃则主要是热解成因的反映,结合地质资料,两者都可以用于指导木里天然气水合物的勘探。
- 4) 根据土壤甲烷衬度异常图,工区中东部甲烷高异常区断裂发育,应该是天然气水合物的有利赋存区。

参 考 文 献

[1] Kvenvolden K A. A review of geochemistry of methane in nature gas hydrate[J]. Organic Geochemistry, 1995, 2(11/12): 997-1008.

[2] Dallimore S R, Collett T S. Intrapermafrost gas hydrates from a deep core hole in the Mackenzie Delta Northwest Territories, Canada[J]. Geology, 1995, 23(6): 527-530.

[3] Collett T S. Natural gas hydrate of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope, Alaska[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 793-812.

[4] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1761-1770.

Zhou Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, et al. Gas Hydrates in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(11): 1761-1770.

[5] 陈强, 业渝光, 刁少波, 等. 海洋天然气水合物研究新进展——2006 西太平洋地球物理会议[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(11): 21-25.

Chen Qiang, Ye Yuguang, Diao Shaobo, et al. New progress in marine gas hydrates; summary from 2006 Western Pacific Geophysics Meeting[J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(11): 21-25.

[6] 雷怀彦, 郑艳红, 吴保祥. 天然气水合物勘探方法——BSR 适用性探析[J]. 海洋石油, 2002, (4): 1-8.

Lei Huaiyan, Zheng Yanhong, Wu Baoxiang. Exploratory method of gas hydrate—research of BSR technology[J]. Offshore Oil, 2002, (4): 1-8.

[7] 符俊辉, 周立发. 南祁连盆地三叠纪地层及石油地质特征[J]. 西北地质科学, 2000, 21(2): 64-72.

Fu Junhui, Zhou Lifa. Triassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features[J]. Northwest Geoscience, 2000, 21(2): 64-72.

[8] 黄霞, 祝有海, 王平康, 等. 祁连山冻土区天然气水合物烃类气体组成的特征和成因[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1851-1856.

Huang Xia, Zhu Youhai, Wang Pingkang, et al. Hydrocarbon gas composition and origin of core gas from the gas hydrate reservoir in Qilian Mountain permafrost[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1851-1856.

[9] 孙春岩, 牛滨华, 王宏语, 等. 西沙海槽研究区天然气水合物地球化学勘探及成藏模式研究[J]. 地学前沿, 2005, 12(1): 243-251.

Sun Chunyan, Niu Binhua, Wang Hongyu, et al. A study of gas hydrate geochemical exploration and deposit formation patterns in the Xisha ocean[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(1): 243-251.

[10] 卢振权, 吴必豪. 海底水合物地球化学探测方法的试验研究[J]. 现代地质, 2002, 16(3): 299-304.

Lu Zhenquan, Wu Bihao. Experimental research on geochemical methods for prospecting gas hydrates in marine sediments[J]. Geoscience, 2002, 16(3): 299-304.

[11] 汤玉平, 丁湘玉, 吴向华, 等. 中国主要含油气盆地区域地球化学场参数特征及其成因研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(3): 1-4.

Tang Yuping, Ding Xiangyu, Wu Xianghua, et al. Features and genesis of regional geochemical fields of the main hydrocarbon-bearing basins in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(3): 1-4.

[12] 孙长青, 陈银节, 荣发准, 等. 川东北地区天然气化探方法实验研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 186-195.

Sun Changqing, Chen Yinjie, Rong Fazhun, et al. Research on geochemical exploration technique for natural gas in the northeastern Sichuan area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(2): 186-195.

[13] 梁世容, 寇新琴. 利用地球化学异常探测水合物[J]. 南海地质研究, 2004: 115-121.

Liang Shirong, Kou Xinqin. Prospecting gas hydrates by geochemical anomaly methods[J]. Geoscience of South China Sea, 2004: 115-121.

[14] 漆富成, 秦明宽, 刘武生, 等. 鄂尔多斯盆地直罗组赋铀沉积相与油气蚀变带的时空配置[J]. 铀矿地质, 2007, 23(2): 65-70.

Qi Fucheng, Qin Mingkuan, Liu Wusheng, et al. Time-space configuration of uranium mineralization, sedimentary facies and oil & gas-induced alteration zone in Zhiluo formation, Ordos basin[J]. Uranium Geology, 2007, 23(2): 65-70.

[15] 庞守吉, 苏新, 何浩, 等. 祁连山冻土区天然气水合物地质控制因素分析[J]. 地学前沿, 2013, 20(1): 223-239.

Pang Shouji, Su Xin, He Jie, et al. Geological controlling factors of gas hydrate occurrence in Qilian Mountain permafrost China[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(1): 223-239.