

# 祁连山冻土区天然气水合物岩心顶空气组分 与同位素的指示意义 ——以DK-9孔为例

唐世琪<sup>1,2</sup>, 卢振权<sup>2,3</sup>, 饶竹<sup>4</sup>, 王婷<sup>2</sup>, 谭盼盼<sup>3</sup>, 刘晖<sup>2</sup>

TANG Shiqi<sup>1,2</sup>, LU Zhenquan<sup>2,3</sup>, RAO Zhu<sup>4</sup>, WANG Ting<sup>2</sup>, TAN Panpan<sup>3</sup>, LIU Hui<sup>2</sup>

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029;

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

4. 国家地质实验测试中心, 北京 100037

1. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China;*

3. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

4. *National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

**摘要:**通过对祁连山冻土区天然气水合物DK-9孔不同深度岩心顶空气中的烃类气体组分及甲烷、乙烷的C同位素分析测试,对比分析了岩心顶空气组分含量变化与天然气水合物及其异常层段、油气显示层段、断层或破碎带分布之间的空间关系,探讨了顶空气组分对天然气水合物及其异常现象、油气显示现象、烃类气体运移作用及顶空气同位素对气体成因的指示意义。结果显示,岩心顶空气中烃类气体含量高的深度段180.26~308.50m、356.45~399.32m、458.55~508.65m与天然气水合物及其异常层段、油气显示层段具有较好的对应关系,其高值区间可作为天然气水合物、油气显示的一种指示。距断层或破碎带产出位置不同的岩心顶空气组分含量变化显示,不同级次的断裂系统为烃类气体向上运移提供了通道,部分可为天然气水合物提供一定的赋存空间;甲烷、乙烷C同位素数据显示气体以热解成因为主,部分为混合成因。

**关键词:**祁连山冻土区;天然气水合物;顶空气组分;C同位素;指示意义

**中图分类号:**P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2015)05-0961-11

**Tang S Q, Lu Z Q, Rao Z, Wang T, Tan P P, Liu H. The indicative significance of gas composition and isotopes of headspace gases from the gas hydrate drilling core in the Qilian Mountain permafrost: A case study of well DK-9. *Geological Bulletin of China*, 2015,34(5):961-971**

**Abstract:** Based on an analysis of hydrocarbon gas components and carbon isotopes of methane and ethane at different depths in headspace gases from the core in well DK-9 in Qilian Mountain permafrost, this paper discusses the spatial relationship of the variation of core headspace gas content with gas hydrate and its anomalous sections, oil-gas showing sections, and fault or fracture zones, and indicated the origin of the hydrocarbon in headspace gases. The results show that the sections of 180.26~308.50m, 356.45~399.32m, 458.55~508.65m with gas component content anomalies are comparable with gas hydrate and its major anomalous layer as

收稿日期:2015-02-12;修订日期:2015-03-30

资助项目:国家自然科学基金项目(批准号:41073040)和天然气水合物勘查与试采专项项目(编号:GZHL20110310、GZHL20110311)

作者简介:唐世琪(1991-),女,在读硕士生,石油地质专业。E-mail:642191779@qq.com

通讯作者:卢振权(1972-),男,博士,研究员,从事天然气水合物地质地球化学勘查等研究。E-mail:luzhq@vip.sina.com

well as oil and gas showing layer; the anomalous section can be used as an indication of gas hydrate and its major anomalies and oil and gas shows. The relationship between variation of hydrocarbon gas content in headspace gases and the location of fault or fracture zones suggests that different levels of the fault system from the depth can provide a channel for deep hydrocarbon gas migration or the space for the formation of gas hydrate. Methane and ethane carbon isotopes suggest that the hydrocarbon gas in headspace gases is genetically mainly composed of pyrolysis gas, with the mixture of some hybrid genetic gas and biogenetic gas.

**Key words:** Qilian Mountain permafrost; gas hydrate; headspace-gas composition; carbon isotope; indicative significance

天然气水合物(简称水合物),是现今备受关注的一种新类型能源,目前全球范围内已发现220多个矿藏点<sup>[1]</sup>。2008年,中国地质调查局首次在祁连山冻土区钻获水合物,实现中国陆域冻土区水合物的勘查突破,这也是全球范围内首次在中低纬度高山冻土区发现的水合物实物样品<sup>[2-3]</sup>。目前,祁连山冻土区先后钻探了DK-1~9等9口水合物钻孔(图1),其中,DK-1~3、DK-7~9等钻获水合物实物样品,同时观察到与其相伴生的异常现象<sup>[4]</sup>。以往研究表明,海域及国外冻土区的水合物气体组成相对简单,绝大多数为甲烷,重烃组分含量低,且水合物的产出具有一定厚度,一般呈层状、透镜状分布于未固结的沉积物中,横向上具有一定的连续性<sup>[5-8]</sup>。与海域及国外冻土区不同,祁连山冻土区水合物有其自身的特殊性,气体组成较复杂,重烃组分普遍发育,横向分布并无明显的分布规律,纵向上分布也不连续,无疑给寻找和研究该区水合物带来一定困难,如水合物的指示标志及其相关的控制因素等仍不清楚。

本文以DK-9孔为例,通过对不同深度岩心顶空气样品烃类气体组分含量的分析,对比研究其随深度的变化与水合物及相关异常现象、油气显示现象产出的空间位置关系,分析岩心顶空气中烃类气体含量高的区间对水合物及油气显示现象产出的指示意义;对比分析距断层或破碎带产出位置不同的岩心顶空气中烃类气体的含量变化特征,研究断裂系统对水合物的气体运移控制作用;分析顶空气体烃类气体组分中甲烷和乙烷的C同位素组成,探讨烃类气体的成因与性质。

## 1 区域地质背景

祁连山主体夹于柴达木、阿拉善2个地块之间,属华北板块西南部的加里东褶皱带,构造区划上可细分为南祁连构造带、中祁连陆块和北祁连构造带,这三大构造单元及其两翼依次被土尔根达坂山—宗务隆山—青海湖南缘、中祁连南缘、中祁连

北缘、北祁连北缘4条断裂所分割。自震旦纪以来,祁连山先后经历了大陆裂谷阶段(震旦纪—中寒武世)、洋底扩张及沟弧盆体系阶段(晚寒武世—中奥陶世)、造山阶段(中奥陶世之后分别经历了俯冲造山、碰撞造山和陆内造山作用)等演化阶段,形成了现今的地质构造格局<sup>[9]</sup>。

祁连山冻土较发育,其内分布有多个侏罗纪小型含煤盆地,已探明储量可观的厚—巨厚煤层<sup>[10]</sup>。此外,该区区域上存在4套质量良好的烃源岩,基本上处于成熟—高成熟阶段,且储层较发育,也是一个潜在的油气区<sup>[11-12]</sup>。良好的气源条件和有利的生储盖组合,无疑对水合物形成十分有利。

本次水合物钻探区构造上处于中祁连陆块靠近南祁连构造带一侧的西段部位,位于木里煤田聚乎更矿区三露天井田内(图1),海拔在4026~4128m之间,冻土厚度一般在60~95m之间<sup>[11-13]</sup>。钻探揭示地层除第四系外,还包括中侏罗统和部分上三叠统。中侏罗统由下而上包含木里组和江仓组,大致对应于区域上的窑街组和享堂组<sup>[14]</sup>,其中木里组( $J_2m$ )为辫状河三角洲—湖泊沉积,是主要的含煤层段,分为上、下2个岩性段,下段以灰色、灰白色粉砂岩、细砂岩和中砂岩为主,底部砾岩发育,上段发育本区主要可采煤层,可见2套可采煤层及局部厚度较薄的煤线;江仓组( $J_2j$ )为辫状河—辫状河三角洲沉积,按岩性也分为上、下2段,下段以深灰色泥岩、粉砂岩和灰色细砂岩、中砂岩为主,含有多个薄煤层,上段以暗色泥岩、灰黑色油页岩为主,不含煤。上三叠统以泥岩、黑色粉砂岩及薄煤层为主,与上覆中侏罗统呈角度不整合接触。

## 2 样品与分析

DK-9孔终孔深度为593.07m,钻遇的水合物及其异常处于冻土层之下,产出在188~508m之间,所在层段岩性主要为泥岩、细砂岩、油页岩等,而在中砂岩、含砾粗砂岩中则较少见到水合物及异常现象。其中,肉眼可辨的水合物主要以薄层状或片状

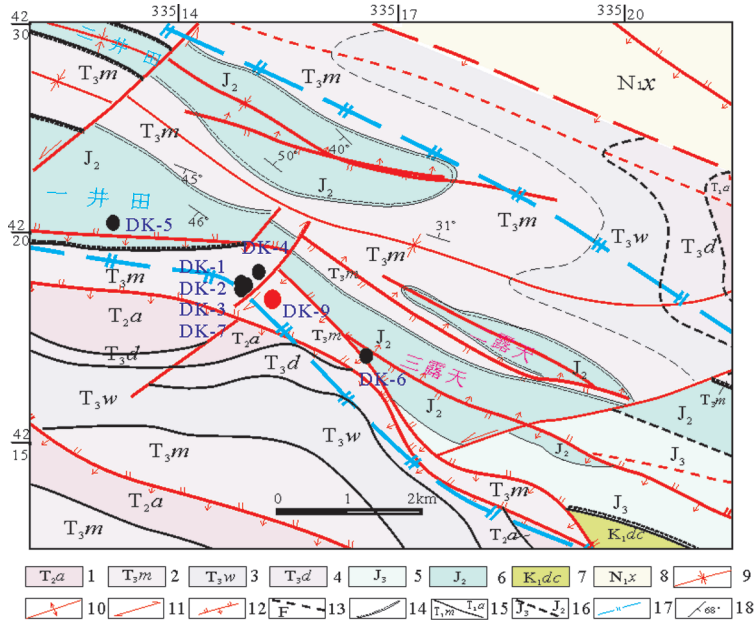


图1 研究区地质特征及钻孔位置分布

Fig.1 Geological characteristics and distribution of gas hydrate drill holes in the study area

- 1—阿子沟组;2—默勒组;3—瓦尔杂组;4—达日格组;5—享堂群;6—窑街群;7—大茶石浪群;8—西宁组;9—实测向斜轴;10—实测背斜轴;11—实测平移断层;12—实测逆断层;13—推测断层;14—不整合地层界线;15—整合地层界限;16—推测地层界限;17—矿区边界;18—地层产状

赋存于泥岩、粉砂岩、油页岩等的裂隙中;推测肉眼不可见的水合物还以浸染状赋存于细砂岩、中砂岩等的孔隙中。

本次从DK-9孔108.3~560.04m深度段共采集到76个岩心顶空气样品。野外采集顶空气样品时,先用精度为0.1g的托盘天平对已准备好的空铁皮罐进行称重(单位:g);在岩心随钻抵达地表的第一时间,用无菌手套采集新鲜岩心,放入已称重的铁皮罐中,再次称重;接着往装有样品的铁皮罐内加满饱和盐水,用量筒倒出100mL液体使铁皮罐顶部留出一定的体积空间;再用吸管往铁皮罐内滴入1~2滴消毒液;最后盖好盖子并用石蜡密封铁皮罐,将其倒置存放在低温环境中,为实验室分析测试做准备。

顶空气样品的分析测试在国家地质实验测试中心进行。测试前先将装有顶空气样品的铁皮罐适当摇匀,并静置24h,然后用真空铁皮针头在铁皮罐顶部打眼,再用注射针头抽出铁皮罐顶部的气体

样品,并将其转移至100mL的玻璃瓶中,稍后或直接将该气体样品注入到气相色谱仪(GC2010)中对其进行分离,气体组分检测由火焰离子探测器(GC-FID)完成。气体组分分析方法依据SY/T 6009.3.2003标准,检测项目包括:甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、正戊烷、异戊烷、二氧化碳等。其中,甲烷检出限为1.00 $\mu$ L/L,乙烷检出限为0.50 $\mu$ L/L,丙烷、正丁烷、异丁烷、正戊烷、异戊烷检出限为0.10 $\mu$ L/L,二氧化碳检出限为50.00 $\mu$ L/L。检测的单位为 $\mu$ L/L,文中将其转化为 $\mu$ L/kg,即检测组分的体积含量 $\times 0.1$ /(装有样品后整个铁皮罐重量-空铁皮罐重量) $\times 1000$ 。

### 3 测试结果

#### 3.1 顶空气组分

本次DK-9孔岩心顶空气样品普遍检测出甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷7种烃类气体组分。其中,甲烷含量变化范围很大,相对含量较高,以每千克(kg)岩心含微升( $\mu$ L)烃类计,甲烷含量在5.98~385870.04 $\mu$ L/kg间变化,平均值为14391.64 $\mu$ L/kg;乙烷除部分样品在检测限以下外,含量在0.52~5166.30 $\mu$ L/kg间变化,平均值为274.49 $\mu$ L/kg;丙烷除部分样品在检测限以下外,含量在0.30~1111.44 $\mu$ L/kg间变化,平均值为132.03 $\mu$ L/kg;异丁烷除部分样品在检测限以下外,含量在0.17~84.7 $\mu$ L/kg间变化,平均值为14.22 $\mu$ L/kg;正丁烷除部分样品在检测限以下外,含量在0.22~276.16 $\mu$ L/kg间变化,平均值为25.12 $\mu$ L/kg;异戊烷除部分样品在检测限以下外,含量在0.12~58.09 $\mu$ L/kg间变化,平均值为5.73 $\mu$ L/kg;正戊烷除部分样品在检测限以下外,含量在0.10~46.24 $\mu$ L/kg间变化,平均值为3.90 $\mu$ L/kg。可以看出,此次顶空气样品烃类气体组分中,气体含量变化范围较大,甲烷含量最高,其他重烃组分普遍发育。

#### 3.2 顶空气组分垂向变化

由于108.30~180.26m之间顶空气样品中丙烷、

异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷含量几乎全部在检测限以下,故对此深度段样品的组分结果暂不予分析。根据不同深度段中烃类气体含量的不同,DK-9孔顶空气中甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷等烃类气体组分含量在180.26~308.50m、308.50~356.45m、356.45~399.32m、399.32~458.55m、458.55~508.65m、508.65~560.04m等深度段分别具有不同的变化特征(图2),其最大值、最小值和平均值列于表1。

其中,在180.26~308.50m深度段,除甲烷外,岩心顶空气中的乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷等烃类气体组分的平均含量均高于整个DK-9孔岩心顶空气中相应的烃类气体平均含量,也高于相邻308.50~356.45m深度段的岩心顶空气中相应烃类气体平均含量。此深度段为顶空气烃类气体高含量区间段。

在308.50~356.45m深度段,除乙烷外,顶空气中烃类气体平均含量均低于整个DK-9孔岩心顶空气的相应烃类气体平均含量;除甲烷外,各种烃类

气体平均含量也低于相邻的180.26~308.50m深度段;与相邻356.45~399.32m深度段相比,所有烃类气体平均含量均要低。此深度段为顶空气烃类气体相对低含量区间段。

在356.45~399.32m深度段,顶空气中烃类气体平均含量均高于整个DK-9孔岩心顶空气的相应烃类气体平均含量;各种烃类气体平均含量也高于相邻的308.50~356.45m和399.32~458.55m深度段。此深度段顶空气烃类气体含量较高,为顶空气烃类气体高含量区间段。

在399.32~458.55m深度段,顶空气中烃类气体平均含量均明显低于整个DK-9孔岩心顶空气的相应烃类气体平均含量;各种烃类气体平均含量均低于相邻的356.45~399.32m深度段;此深度段内甲烷、乙烷含量的平均值和异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷含量的最大值均低于相邻的458.55m~508.65m深度段。此深度段为顶空气烃类气体低含量区间段。

在458.55~508.65m深度段,虽然异丁烷、正丁

表1 DK-9孔岩心顶空气烃类气体含量在不同深度段中的变化

Table 1 Variation of gas composition at different intervals in headspace gases from the core in DK-9

深度段/m		180.26 ~ 308.50	308.50 ~ 356.45	356.45 ~ 399.32	399.32 ~ 458.55	458.55 ~ 508.65	508.65 ~ 560.04
甲烷 / $\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值	6.17	2281.66	292.05	7.03	124.68	7.04
	最大值	14473.07	23726.61	385870.04	3210.74	58705.05	6297.48
	平均值	4439.26	11225.23	65110.79	961.65	8753.20	1527.20
乙烷 / $\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值	6.07	181.60	9.23	1.12	0.52	1.22
	最大值	915.37	365.30	5166.29	61.30	112.81	45.8
	平均值	373.92	278.55	1118.64	15.26	16.18	12.10
丙烷 / $\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值	2.41	0.10	1.63	0.61	0.10	0.39
	最大值	599.71	161.44	1111.32	20.31	29.50	6.09
	平均值	153.13	87.60	373.36	6.98	15.52	2.52
异丁烷 / $\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值	0.17	10.10	0.10	0.10	—	0.18
	最大值	84.70	17.62	57.60	1.60	2.55	0.50
	平均值	16.26	12.87	27.13	1.23	—	0.31
正丁烷 / $\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值	0.83	10.18	0.10	0.10	—	0.22
	最大值	276.60	23.52	62.70	1.29	3.05	0.33
	平均值	39.71	14.50	29.87	1.03	—	0.26
异戊烷 / $\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值	0.45	1.81	0.10	0.10	—	—
	最大值	58.13	4.99	20.14	0.14	0.18	—
	平均值	8.10	3.36	7.13	0.12	—	—
正戊烷 / $\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值	0.20	0.91	0.10	0.10	—	—
	最大值	46.20	2.20	9.94	0.32	0.34	—
	平均值	6.47	1.66	4.23	0.25	—	—

注:“—”为无检测值



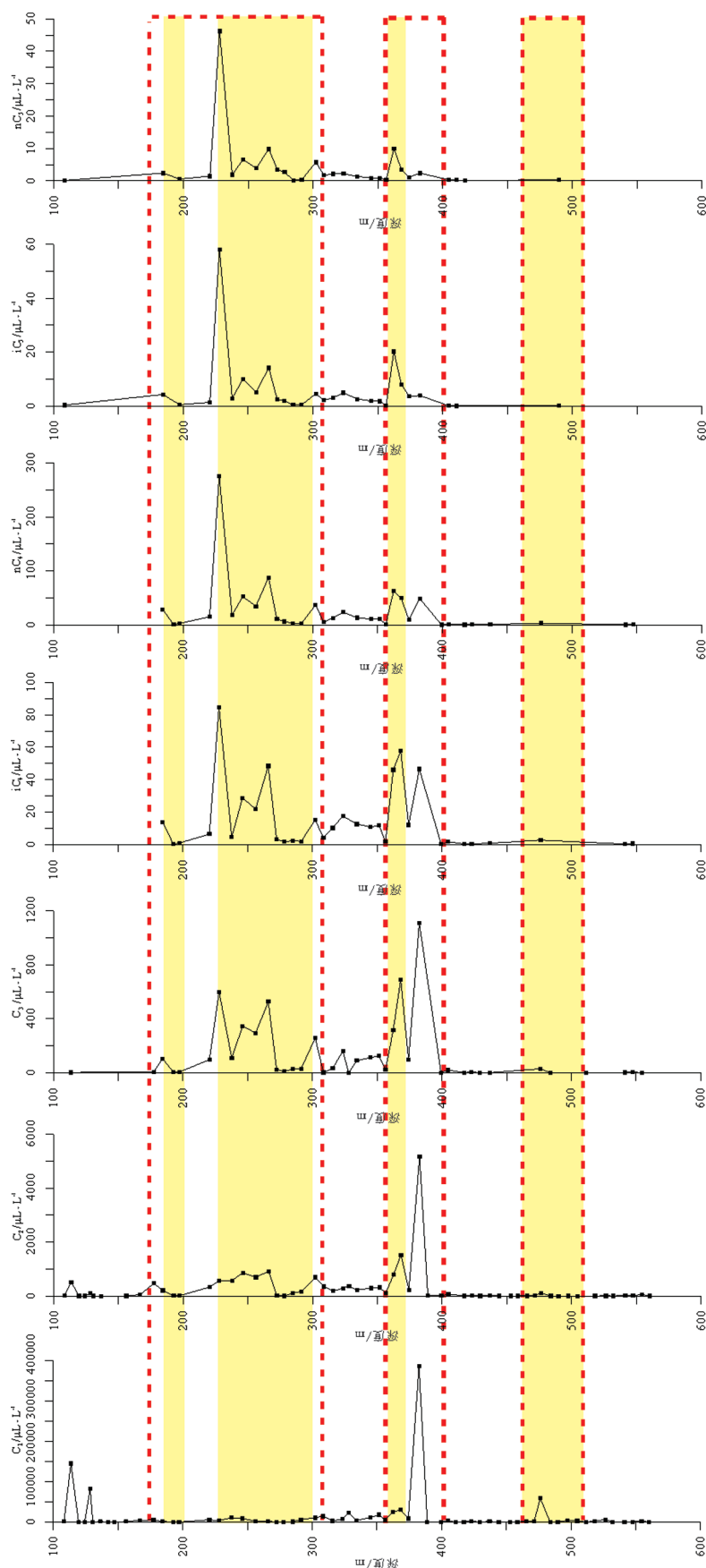


图 2 DK-9 孔不同深度岩心顶空气烃类气体组分含量变化(红色虚线框为高含量区域) 与水合物及其异常现象产出层段(黄色区域)对比

Fig. 2 Comparison of hydrocarbon content in headspace gases from core at different intervals (high content with red dash block) and outputs of gas hydrate and its major anomalies (yellow areas) in DK-9

烷、异戊烷、正戊烷分别只有1个样品结果在检测限以上,但与相邻399.32m~458.55m和508.65~560.04m深度段相比,其内顶空气烃类气体各含量平均值及最大值均高于相邻两深度段。此深度段为顶空气烃类气体相对高含量区间段。

在508.65~560.04m深度段,所有样品的异戊烷、正戊烷含量均在检测限以下,其甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷含量的平均值均低于整个DK-9孔岩心顶空气的相应烃类气体平均含量,也低于相邻458.55~508.65m深度段。此深度段为顶空气烃类气体低含量区间段。

综上所述,DK-9孔岩心顶空气中甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷等烃类气体含量,在垂直深度上可划分为180.26~308.50m、356.45~399.32m、458.55~508.65m三个高含量区间段(图2中红色虚线框所示)。

## 4 讨论

### 4.1 顶空气组分对水合物的指示意义

钻探揭示,DK-9孔水合物及其异常现象产出层段总体在188.20~507.50m之间。其中,水合物及异常现象主要产出在4个深度段内(表2),分别为:①188.20~202.37m、②227.74~301.15m、③358.60~366.29m、④461.97~507.50m(图2中黄色阴影区域所示)。

在第①深度段中,水合物及其异常现象分布较集中,如在188.20m、193.85m、198.10m、198.85m、199.55m、199.65m、200.24m深度处均肉眼可见水合物晶体,主要产出在细砂岩和泥岩的裂隙面上,多呈白色或浅黄白色,点之可以燃烧。在193.19m、193.40m、202.37m深度处则出现与水合物相伴生的异常现象,如强烈冒泡、呈沸腾状、点火助燃等。对比可知,水合物及其异常现象产出的第①深度段完全处于岩心顶空气高含量区间段180.26~308.50m内。

在第②深度段中,水合物及其异常现象分布较零散,如在270.69m、

301.15m深度处,肉眼可见到水合物的产出,它们多分布在泥岩裂隙面上,呈黄色或白色冰状物,点之可燃烧。在227.74m、237.35m、250.40m深度处,还可见与水合物相伴生的异常现象,如强烈冒泡、点火助燃、强烈煤油味等。对比可知,该深度段内的水合物及其异常现象与顶空气高含量区间段180.26~308.50m相对应。

在第③深度段中,水合物及其异常现象产出较为密集,如在358.60m泥岩裂隙面处可见有水合物晶体,在361.03m、366.29m深度处出现与水合物相伴生的异常现象,如强烈冒泡、呈沸腾状、点火助燃、渗出水珠等。对比可知,此深度段内的水合物及其异常现象与顶空气高含量区间段356.45~399.32m在空间上有着一定的对应关系。

在第④深度段中,虽未直接见到水合物晶体,但在461.97m、497.89m、501.27m、507.50m深度处见有与水合物相伴生的异常现象。此深度段异常现象多表现为,岩心新鲜面处冒气泡、渗水现象,并伴随轻微煤油味。对比可知,这些异常处于顶空气相

表2 DK-9孔水合物及其主要异常现象

Table 2 Gas hydrate and its major anomalies in DK-9

深度/m	岩性	水合物及其主要异常现象
188.20	细砂岩	裂隙面有薄层水合物,点火燃烧成沸腾状,新鲜面有渗水现象
193.19	粉砂岩	裂隙处强烈冒泡,点火助燃
193.40	细砂岩	强烈冒泡,点火燃烧成沸腾状,有轻微煤油味
193.85	泥岩	裂隙处有强烈冒泡,见泥灰色薄层状水合物,有轻微油味
198.10	泥岩	裂隙面上见浅黄白色水合物晶体,点火助燃,成沸腾状
198.85	泥岩	裂隙面上见浅黄白色水合物晶体,点火助燃,成沸腾状
199.55	泥岩	裂隙面上可见水合物白色透明晶体,点火可以燃烧
199.65	泥岩	裂隙面可见水合物白色透明晶体,点火可以燃烧
200.24	泥岩	裂隙面上可见水合物白色透明晶体,点火可以燃烧
202.37	泥岩	裂隙面上有强烈冒泡现象
227.74	泥岩	裂隙面上有强烈冒泡现象,点火助燃,呈沸腾状
237.35	泥岩	裂隙面强烈冒泡,有黄色泡沫,点火助燃,有强烈煤油气味
250.40	油页岩	裂隙面强烈冒泡,有强烈煤油味,点火助燃
270.69	泥岩	裂隙面有黄色胶状物和白色冰状物,点火可燃烧
301.15	泥岩	裂隙面有黄色胶状物和白色冰状物,点火可燃烧
358.60	泥岩	裂隙面有水合物晶体
361.03	细砂岩	强烈冒泡,点火助燃,呈沸腾状,有水珠渗出
366.29	细砂岩	强烈冒泡,点火助燃,呈沸腾状
461.97	细砂岩	细砂岩新鲜面可见渗水现象,有轻微煤油味
497.89	粗砂岩	粗砂岩孔隙、裂隙见中等—强烈冒泡
501.27	含砾粗砂岩	新鲜岩心面可见气泡并伴少量渗水现象
507.50	含砾粗砂岩	岩心面见气泡并伴少量渗水现象

对高含量的458.55~508.65m区间段内。

综上所述,DK-9孔水合物及其异常现象所在的第①~④深度段与前述岩心顶空气高含量区间段,在空间上具有较好的对应关系,指示高含量烃类气体与这些水合物及其相关异常现象有关。

#### 4.2 顶空气组分对油气显示的指示意义

钻探揭示,DK-9孔不同深度处往往伴随着不同程度的油气显示现象(表3,图3)。例如,在顶空气烃类含量相对高的180.26~308.50m区间段内,存在一系列油气显示现象,分别位于188.05m、200.15m、204.47~204.57m、209.12~209.45m、225.34m、237.03m、249.12m、258.70m、268.70m、270.47m、285.49m、288.54m、304.12m处,其油气显示现象的强弱在垂向上与顶空气中烃类含量的变化有很好的对应关系。其中,在237.15m、302.19m、308.50m处,烃类气体含量在此区间段内均为高值,且以甲烷含量最为明显,分别为10905.44 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 、10366.02 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 和14473.07 $\mu\text{L}/\text{kg}$ ,明显高于区间段内其他顶空气样品。相应地,在这些深度附近的

237.03m、304.12m处,油气显示现象强烈,除在细砂岩、泥岩裂隙面处的强烈煤油味外,这些油气显示现象还普遍出现黄褐色—黑褐色油斑等。

在烃类气体高含量区间段356.45~399.32m内也存在一系列的油气显示现象,它们分别位于358.70m、360.93m、365.56m、366.90m和368.05m处。岩心顶空气烃类含量显示,在362.45m和368.22m处,各种烃类气体含量均明显高于区间段内其他顶空气样品,其中甲烷含量分别为24564.76 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 和30547.78 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 。相应地,在这些深度或附近的365.56m、366.90m、368.05m处,油气显示强烈,表现为细砂岩表面油斑渗出,有强烈煤油味,中砂岩表面出现大面积油浸现象。

在烃类气体高含量区间段458.55~508.65m内,476.25m深度处烃类气体含量均明显高于区间段内其他顶空气样品,其中甲烷含量达到58705.05 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 。相应地,在此深度附近的485.94m处出现一处较为强烈的油气显示现象,表现为粉砂质泥岩表面局部见油斑渗出,伴随有强烈的煤油味。

表3 DK-9孔钻探揭示油气显示现象  
Table 3 Indications of oil and gas in DK-9

深度/m	岩性	油气显示现象
188.05	细砂岩	新鲜面有强烈煤油味
200.15	泥岩	断裂面有强烈煤油味
204.47~204.57	油页岩	断裂面有黄色胶状物,有强烈煤油味
209.12~209.45	油页岩	断裂面有黄色胶状物,有强烈煤油味
225.34	泥岩	断裂面有强烈煤油味
237.03	细砂岩	裂隙面有强烈煤油味,可见褐色油浸
249.12	油页岩	断裂面有强烈煤油味,并伴有方解石
258.70	油页岩	裂隙面有强烈气泡冒出,点火无明显助燃,有轻微煤油味
268.70	泥岩	裂隙面有黄色沉淀物,伴有强烈煤油味
270.47	泥岩	裂隙面有黄色沉淀物,伴有强烈煤油味
285.49	泥岩	裂隙面有黄绿色沉淀物,伴有强烈煤油味
288.54	泥岩	裂隙面有黄绿色沉淀物,有强烈煤油味
304.12	钙质泥岩	裂隙面见黄褐色油斑浸出现象
315.79	泥岩	裂隙面见黄褐色油斑浸出现象,有强烈煤油味
319.77	泥岩	薄层方解石中可见黑褐色油斑浸出现象,有强烈煤油味
320.37	泥岩	部分方解石细脉中可见黑褐色油斑现象,有强烈煤油味
358.70	泥岩	裂隙面有褐色沉淀物,有强烈煤油味
360.93	细砂岩	裂隙表面有黄色泡沫状胶状物,有强烈煤油味
365.56	细砂岩	表面强烈冒泡,有黄色泡沫,点火助燃,有强烈煤油味
366.90	细砂岩	表面有黄褐色烃类渗出,有强烈煤油味
368.05	中、细砂岩	中砂岩出现大面积油浸、油染现象,细砂岩中可见油斑渗出现象
485.94	粉砂质泥岩	局部见油迹渗出,有强烈煤油味

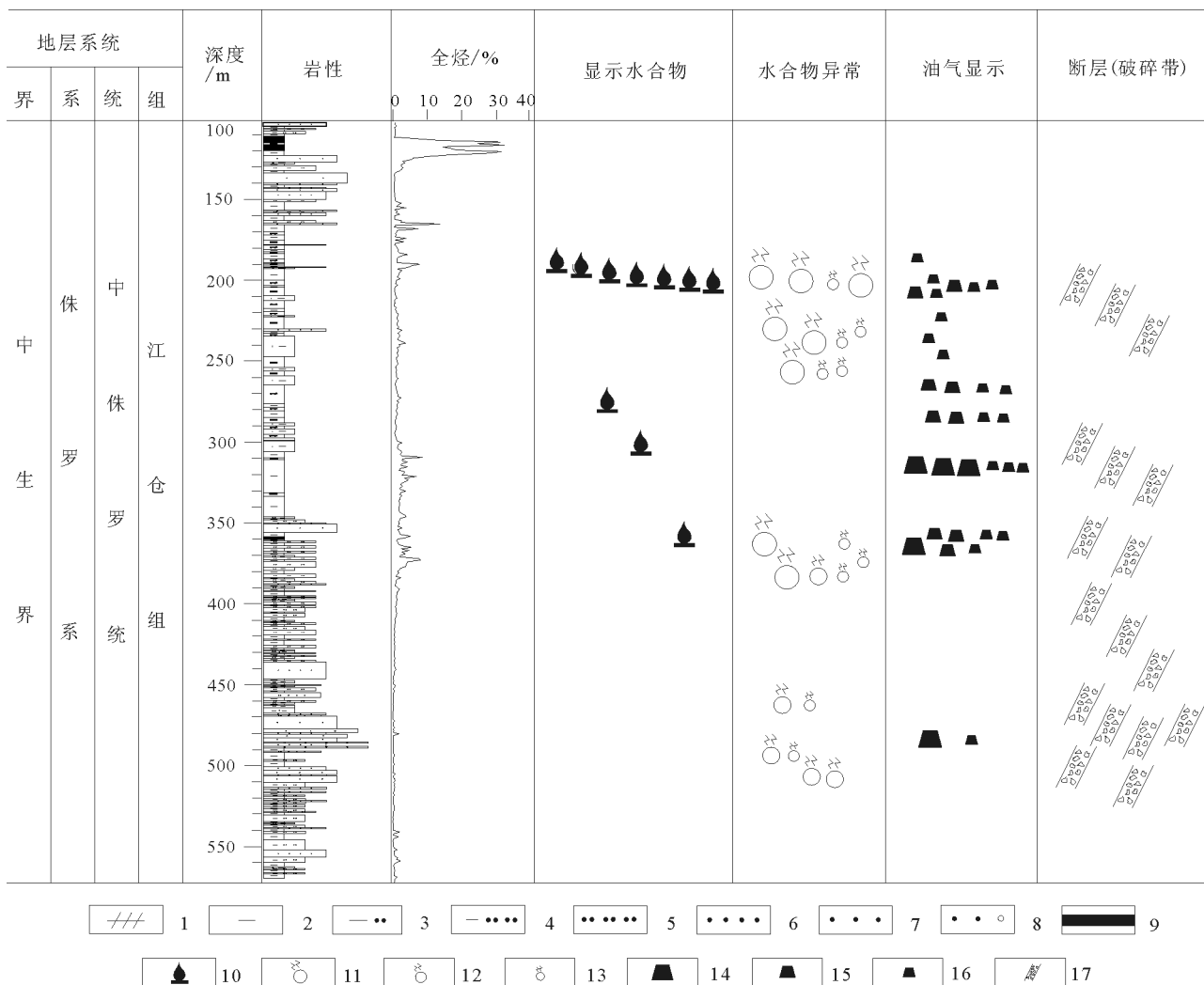


图3 DK-9孔水合物、油气显示与断层位置相对分布

Fig. 3 Relative spatial distribution of gas hydrate, oil and gas, and faults in DK-9

- 1—油页岩; 2—泥岩; 3—粉砂质泥岩; 4—泥质粉砂岩; 5—粉砂岩; 6—细砂岩; 7—中砂岩; 8—含砾粗砂岩;
- 9—煤; 10—天然气水合物; 11—强烈冒泡; 12—渗水现象或一般冒泡现象; 13—具油气味;
- 14—油浸现象; 15—黄褐色沉淀物; 16—具强烈煤油味; 17—断层(破碎带)

整体上,油气显示现象的强弱随烃类气体含量高低呈现规律性的变化,它们在空间位置上彼此有较好的对应关系。

### 4.3 顶空气组分对气体运移的指示意义

由于不同的烃类气体具有不同的扩散速率,甲烷伴随着乙烷、丙烷、丁烷、戊烷等重烃组分一起大量出现,指示烃类气体由下部运移而来,并非是由原地有机质转化而成<sup>[15]</sup>。丁烷的出现一般指示深部气体的扩散渗漏作用<sup>[16]</sup>。根据过去对研究区水合物及其异常现象产出层段内的生烃岩有机地球化学

研究,其内的煤、泥岩、油页岩等尚未产生大量烃类气体,表明DK-9孔岩心顶空气样品中的烃类气体大部分只能从下部而来<sup>[17]</sup>。由于该区断裂构造发育,DK-9孔即位于研究区内F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>两条逆冲断裂之间,钻孔不同深度处普遍发育断层和破碎带(表4)。

例如,在DK-9孔岩心顶空气烃类高含量的180.26~308.50m区间段内,钻探揭示4条断层或破碎带,分别产于204.49~206.36m、214.12~214.81m、237.03~239.41m和302.92~303.02m之间,该断层或破碎带整体岩心破碎成碎块状,在断层面上可见断



层泥。虽然在 204.49~206.36m、214.12~214.81m 之间的 2 条断层或破碎带距离较近,但在 2 条断层带直至其上约 192.69m 深度处,烃类含量呈逐渐减少的趋势,显示出烃类气体沿断层或破碎带向上运移的特征。在断层带 237.03~239.41m 直至其上约 227.94m 处,烃类含量呈减少趋势,也显示出烃类气体沿断层或破碎带向上运移的特征。在此断层带内 237.35m 处,见有水合物及其异常现象产出(图 3),表明该深度段断层或破碎带同时可成为水合物的赋存空间。此外,在 302.92~303.02m 断层带直至其上约 278.05m 处,烃类含量逐渐减少,均显示出烃类气体沿着断层或破碎带向上运移的特征。在此断层带之上的 301.15m 处,可见水合物及其异常现象,推断前述断层带为水合物成藏气体提供运移通道作用。

在顶空气烃类含量高的 356.45~399.32m 区间段内,见有 2 条断层或破碎带,产于 360.60~361.70m 和 373.71~374.58m 间,该断层或破碎带裂隙发育,岩心顶部与上部岩层呈断层接触,局部可见断层泥。2 条断层带内的烃类气体含量明显比断层带之上(至约 356.45m)高,表明烃类气体沿着断层或破碎带向上运移。在此深度范围内的 358.60m、361.03m、365.56m 和 366.29m 处分别见水

合物及其异常现象产出,其中 361.03m 位于断层或破碎带内,说明该深度段断层或破碎带为烃类气体向上运移提供通道的同时,还可为水合物提供一定的赋存空间。

在顶空气烃类含量较高的 458.55~508.65m 段内共发育 5 条断层或破碎带,它们分别产于 463.28~464.61m、467.00~467.70m、472.27~472.97m、477.23~478.33m、487.72~488.62m 间。这些断层或破碎带岩心较破碎,局部见断层错动现象、断层泥、断层角砾等。其中,463.28~464.61m、467.00~467.70m、472.27~472.97m、477.23~478.33m 间断层或破碎带内的烃类气体含量均比断层之上(至约 444.25m 深度处)的高;487.72~488.62m 间断层或破碎带内至其上部一定范围内(至约 480.86m 处)烃类气体含量也逐渐降低。这些特征均显示出断层或破碎带对烃类气体运移的影响。

结合以往对 DK-1、DK-2、DK-3、DK-7、DK-8 水合物钻孔等的分析,水合物在纵向上多呈不连续分布,主要产出在井下 130~400m,横向上无明显的对应关系,受断层或破碎带影响较大<sup>[18]</sup>,受传统砂岩类储集层约束较小<sup>[19-20]</sup>。本次对 DK-9 孔岩心顶空气烃类气体含量与断层或破碎带空间关系的分析进一步验证了该结论。

表 4 DK-9 孔钻揭示断层(破碎带)产出层位

Table 4 Fault (fracture zone) occurrences in DK-9

深度段/m	岩性	断层或破碎带主要特征
204.49~206.36	断层角砾岩、灰—灰褐色泥岩	整体岩心较破碎成碎块状,断层接触,泥岩中发育裂隙
214.12~214.81	黑褐色油页岩夹深灰色泥岩	岩心整体破碎,裂隙发育,可见断层错动现象
237.03~239.41	细砂岩夹粉砂质泥岩	岩心破碎,在断层面可见断层泥
302.92~303.02	钙质泥岩	局部破碎,裂隙发育,10cm 长岩心发育 6 条裂隙
319.77~320.06	灰褐色—灰黑色泥岩	裂隙发育,10cm 长岩心发育 10 条裂隙
328.05~329.11	灰褐色—灰黑色泥岩夹油页岩	破碎带,岩心破碎成碎块状或碎片状
360.60~361.70	泥质粉砂岩	裂隙发育,顶部与上部岩层为断层接触
373.71~374.58	深灰色—灰黑色泥岩夹粉砂岩	裂隙发育,局部破碎成泥块状,局部可见断层泥
402.18~403.51	深灰色泥岩	顶部泥岩与上层断层明显断层接触,见断层角砾
420.76~423.15	泥质粉砂岩	岩层破碎,裂隙发育,可见断层泥及断层角砾现象
437.01~437.34	粉砂岩夹泥岩	岩心破碎且裂隙发育,局部可见断层泥
463.28~464.61	灰白色细砂岩	部分成碎块状且裂隙发育,可见断层错动,裂隙充填断层泥
467.00~467.70	深灰色—灰黑色泥岩	岩心较破碎,有断层错动现象,可见断层泥和断层角砾
472.27~472.97	深灰色—灰黑色泥岩	局部岩心较破碎且裂隙发育,裂隙面充填断层泥
477.23~478.33	灰黑色泥岩	岩心较破碎,局部见断层错动现象,可见断层泥和断层角砾
487.72~488.62	浅色—浅灰色含泥粉砂岩	底部与下层呈断层接触,断层面清晰可见断层泥
508.56~509.96	含砾粗砂岩	局部裂隙发育成破碎状,下部有断层泥

4.4 顶空气同位素对气体成因的指示意义

本次共获得35个岩心顶空气样品的甲烷C同位素数据和18个样品的乙烷C同位素数据。其 $\delta^{13}C_1$ 值在-72.6‰~-39.4‰之间,平均值为-52.0‰;  $\delta^{13}C_2$ 值在-42.5‰~-18.1‰之间,平均值为-33.9‰。所有样品烃类气体C同位素随碳数增加而增加,均表现出 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2$ 的特征,即正碳同位素系列,显示研究区钻孔岩心顶空气的有机气体成因。本次样品中, $\delta^{13}C_1$ 值>-55‰的共有22个, $\delta^{13}C_1$ 值小于-55‰的共有13个,说明顶空气气体除了主要为热解气外,还很可能受到了混合气体的影响<sup>[2]</sup>。

依据 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 关系图解,可将DK-9孔岩心顶空气划分为油型气、煤成气及油型气、煤成气混合气等。将DK-9孔岩心顶空气组成中的 $\delta^{13}C_1$ 值和 $\delta^{13}C_2$ 值进行投点(图4),显示本次岩心顶空气整体为油型气,并含有少量的生物气。将DK-9孔岩心顶空气组成中 $C_1/(C_2+C_3)$ 值和 $\delta^{13}C_1$ 值进行投点(图5),数据点虽然较为分散,但主要显示为热成因气与混合成因气,少部分为微生物成因气。将本次顶空气体组成中 $C_1/(C_2+C_3)$ 值和 $\delta^{13}C_1$ 值进一步投点到陆上常规天然气 $\delta^{13}C_1 - C_1/(C_2+C_3)$ 关系图解(图6)上,可以看出DK-9孔岩心顶空气主要为原油伴生气,并混有少量亚生物气、生物气等的混合气。

前人<sup>[21]</sup>研究表明,祁连山冻土区天然气水合物气体以热解成因为主,气体来源与油型气密切相关。本次DK-9孔岩心顶空气体组成较为复杂,重

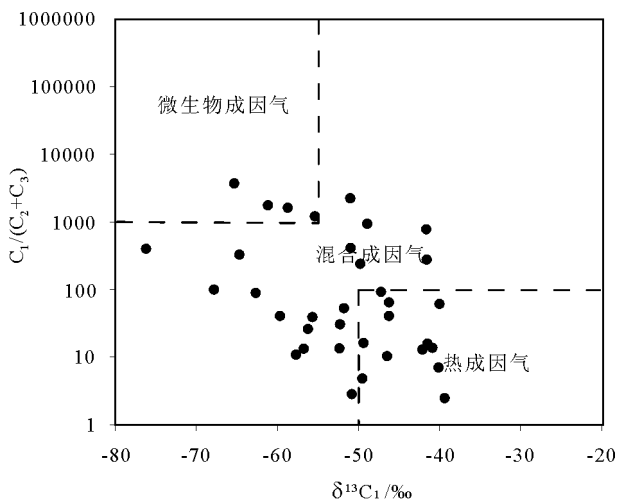


图5 DK-9孔岩心顶空气 $\delta^{13}C_1 - C_1/(C_2+C_3)$ 图解  
Fig. 5 Plot of  $\delta^{13}C_1 - C_1/(C_2+C_3)$  in headspace gases from the core in DK-9

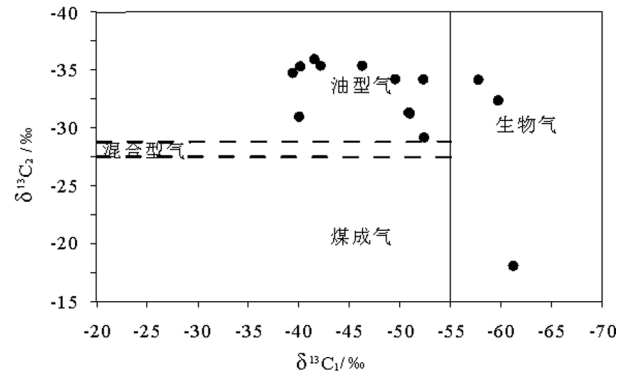


图4 DK-9孔岩心顶空气 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 图解  
Fig. 4 Plot of  $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$  in headspace gases from the core in DK-9

烃组分普遍发育,再加上其产出于煤系地层,钻探过程中又可见油斑、油浸等一系列油气显示现象,综合投点显示顶空气烃类气体组成除以热解气为主外,还存在着如微生物等不同来源烃类的加入。

5 结论

(1) 祁连山冻土区钻孔岩心顶空气中烃类气体高含量区段与水合物及其异常现象、油气显示现象等产出深度段具有可比性。岩心顶空气组分对水合物及其异常现象、油气显示现象等具有指示意义。

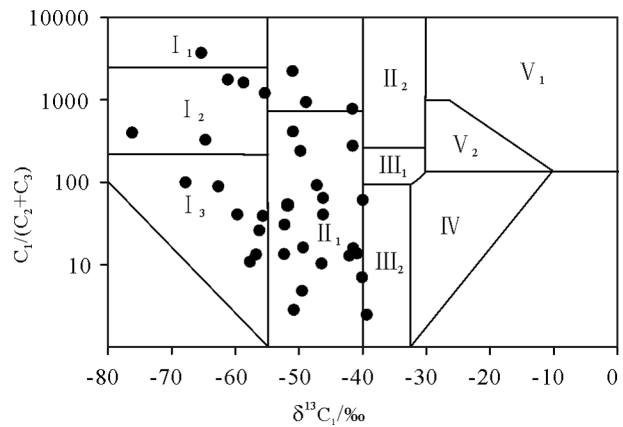


图6 DK-9孔岩心顶空气 $\delta^{13}C_1 - C_1/(C_2+C_3)$ 图解  
Fig. 6 Plot of  $\delta^{13}C_1 - C_1/(C_2+C_3)$  in headspace gases from the core in DK-9  
I<sub>1</sub>—生物气; I<sub>2</sub>—生物和亚生物混合气; I<sub>3</sub>—亚生物气;  
II<sub>1</sub>—原油伴生气; II<sub>2</sub>—油型裂解气; III<sub>1</sub>—油型裂解和煤成混合气; III<sub>2</sub>—凝析油伴生和煤成混合气; IV—煤成气; V<sub>1</sub>—无机气; V<sub>2</sub>—无机和煤成混合气

(2) 钻孔岩心顶空气组分含量由断层或破碎带向上逐渐降低,显示不同级次的断裂系统可以为烃类气体向上运移提供通道。部分水合物直接产出在断层或破碎带内,显示断层或破碎带可为水合物的形成提供一定赋存空间。

(3) 钻孔岩心顶空气与油型气密切相关,气体组成以热解成因气体为主,局部存在着混合成因或微生物成因气体。

### 参考文献

- [1] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates—A potential energy source for the 21st Century[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56: 14–31.
- [2] Lu Z, Zhu Y, Zhang Y, et al. Gas hydrate occurrences in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai Province, China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 66(2/3): 93–104.
- [3] 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): 1762–1771.
- [4] 卢振权,祝有海,张永勤等.青海祁连山冻土区天然气水合物存在的主要证据[J].*现代地质*, 2010, 24(2):329–336.
- [5] Dallimore S R, Collett T S. Scientific results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada[J]. *Geological Survey of Canada Bulletin*,2005, 585: 1–140.
- [6] Kim G Y, Yi B Y, Yoo D G, et al. Evidence of gas hydrate from downhole logging data in the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1979–1985.
- [7] Shankar U, Riedel M. Gas hydrate saturation in the Krishna-Godavari Basin from P-wave velocity and electrical resistivity logs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1768–1778.
- [8] Makogon Y F. Natural gas hydrates—a promising source of energy[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2010, 2(1): 49–59.
- [9] 冯益民.祁连造山带研究概况——历史、现状及展望[J].*地球科学进展*,1997,12(4):307–314.
- [10] 白先海.青海省侏罗纪含煤盆地及含煤地层[J].*中国煤田地质*, 1993,5(3):20–23.
- [11] 符俊辉,周立发.南祁连盆地石炭—侏罗纪地层区划及石油地质特征[J].*西北地质科学*,1998,19(2):47–54.
- [12] 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.
- [13] 张雪亭,杨生德.青海省板块构造研究——1:100万青海省大地构造图说明书[M].北京:地质出版社, 2007: 1–221.
- [14] 青海省地质矿产局.青海省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [15] 卢振权,吴必豪,祝有海.南海潜在天然气水合物藏的成因及形成模式初探[J].*矿床地质*, 2002, 21(3): 232–239.
- [16] Abrams M A. Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22: 457–477.
- [17] Lu Z, Zhu Y, Liu H, et al. Gas source for gas hydrate and its significance in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 341–348.
- [18] 王平康,祝有海,卢振权,等.祁连山冻土区天然气水合物岩性和分布特征[J].*地质通报*,2011,30(12):1839–1850.
- [19] 卢振权,祝有海,张永勤,等.青海省祁连山冻土区天然气水合物基本地质特征[J].*矿床地质*,2010,29(1):182–191.
- [20] 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].*地学前缘*,2013,20(1):223–239.
- [21] 卢振权,祝有海,张永勤,等.青海祁连山冻土区天然气水合物的气体成因研究[J].*现代地质*, 2010,24(3): 581–588.
- [22] 戴金星.各类烷烃气的鉴别[J].*中国科学(B辑)*,1992,2:185–193.