

南祁连盆地木里冻土区天然气水合物烃源岩特征及评价

张家政¹, 祝有海¹, 黄霞¹, 王明君¹, 赵广珍², 王平康¹, 张帅¹, 庞守吉¹
ZHANG Jiazheng¹, ZHU Youhai¹, HUANG Xia¹, WANG Mingjun¹, ZHAO Guangzhen²,
WANG Pingkang¹, ZHANG Shuai¹, PANG Shouji¹

1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029;

2. 联合能源(北京)有限公司, 北京 100016

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

2. *United Energy (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100016, China*

摘要:中国地质调查局2008年在南祁连盆地木里冻土区采集到了中国陆域第一例天然气水合物实物样品,对于天然气水合物的气体来源存在不同的认识。利用新完钻3口井样品的化验分析结果,分析了中侏罗统和上三叠统烃源岩有机地球化学特征。结果表明,中侏罗统江仓组、木里组煤系地层烃源岩有机质丰度较高,TOC(总有机碳含量)大于1%的样品占78.9%;氯仿沥青“A”含量大于0.1%的占总数的72.2%;有机质类型以II₂、II₁型为主;镜质体反射率R_o多介于0.7%~1.2%之间;71个样品生烃潜力平均值为8.8mg/g,总体处于生烃高峰期的生油阶段或凝析油阶段,属于好、很好烃源岩,为天然气水合物主力生烃层系。上三叠统尕勒得寺组亦为煤系地层烃源岩,TOC含量大于1%的样品占76.9%;氯仿沥青“A”含量小于0.05%;有机质类型以III、II₁型为主;镜质体反射率R_o介于1.1%~1.77%之间;总体处于生湿气或干气阶段,但由于构造抬升影响其生烃潜力,平均值仅为0.35mg/g,当前整体生烃能力较差,为非烃源岩或较差烃源岩,对天然气水合物成藏贡献不大。

关键词:天然气水合物;中侏罗统;上三叠统;烃源岩特征;木里冻土区;南祁连盆地

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)04-0634-10

Zhang J Z, Zhu Y H, Huang X, Wang M J, Zhao G Z, Wang P K, Zhang S, Pang S J. Characterization and evaluation on the source rock of gas hydrate in Muli permafrost area, Nanqilian Basin. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(4):634-643

Abstract: China's first permafrost gas hydrate samples were collected by China Geological Survey in 2008 in Muli permafrost area, Nanqilian Basin. There exist different opinions concerning the genesis or origin of gases from gas hydrate. The organic geochemical indicators were systematically analyzed on the gas source rocks of the Middle Jurassic and the Upper Triassic from recently drilled 3 wells. The results show that the organic matter values are at high levels in source rocks of the Middle Jurassic strata (Jiangcang and Muli Formation) in the study area. 78.9% of TOC values are more than 1.0%, and 72.2% of chloroform bitumen 'A' are more than 0.1%. The main organic matter is of type II₂ and II₁. The vitrinite reflectances of most samples are between 0.7% to 1.2%. The average value of total hydrocarbon generation potential is 8.8mg/g rock in total 71 samples. So the organic matters in most samples are at mature levels, or at condensate levels, which are good and very good source rocks for the gases of gas hydrates. The organic matter values are also at high levels in source rocks of the Upper Triassic strata (Galedesi Formation). 76.9% of TOC values are more than 1.0%. The chloroform bitumen 'A' is less than 0.05%. The main organic matters are of type III and II₁. The vitrinite reflectances of most samples are between 1.1% and 1.77%. Hence the organic matters in most samples are at post mature levels, or at dry gas levels,

收稿日期:2016-10-18;修订日期:2017-02-07

资助项目:中国地质调查局项目《陆域天然气水合物资源潜力评价》(编号:DD20160226)、《青南藏北冻土区天然气水合物调查》(编号:DD20160222)、《南祁连盆地油气资源战略调查》(编号:1211302108021-2)

作者简介:张家政(1973-),男,博士,高级工程师,从事石油地质和天然气水合物研究。E-mail: 626687675@qq.com

but the average value of total hydrocarbon generation potential is only 0.35 mg/g rock in total 39 samples, suggesting poor source rocks or barren rocks for the gases of gas hydrates.

Key words: gas hydrate; Middle Jurassic; Upper Triassic; source rock characteristics; Muli permafrost; Nanqilian Basin

天然气水合物是由气体分子(烃类气体如 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 等和非烃气体如 CO_2 、 H_2S 等)与水分子在一定温度压力下形成的笼型化合物,由于其外形呈冰状,又称“可燃冰”,广泛分布于大陆边缘海水深300m以下的海底沉积物及陆地的永久冻土区^[1-2]。迄今已在全球发现天然气水合物产地132处,其中海底及湖底沉积物123处,陆地冻土区9处^[3-4]。一般认为,全球天然气水合物中所含的天然气资源量远超过全球已探明的天然气储量^[5]。天然气水合物因其能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅,已被视为21世纪的一种潜在能源^[6]。

自2000年起,青藏高原多年冻土区天然气水合物资源已引起有关方面的重视,相关专家在该区先后开展了地质、地球化学、地球物理等方面的调查研究^[7-13]。2008年中国地质调查局首次在青海省祁连山南部多年冻土区实施天然气水合物科学实验钻探工程,并采集到中国陆域第一例天然气水合物实物样品^[14-16]。对于天然气水合物的气源来自哪一层系、其赋存层段的烃源岩是否可以作为天然气水合物的形成提供良好的气源条件,仍存在着不同的认识,可归纳为3种主要认识:①水合物气源属于煤成气,且气源主要来自于木里煤田中侏罗统江仓组、木里组的煤层及其附近的炭质泥岩^[17-18];②天然气水合物属于混合型气源,即煤成气和油型气都有,煤成气来自于侏罗系的煤层,油型气可能来自于下伏上三叠统尕勒得寺组、中二叠统草地沟组、石炭系暗色泥岩^[19-22];③除少量浅层岩心烃类气体可能含有少量生物成因气外,天然气水合物样品的气源组成均以热解成因气为主,为典型的有机成因烃类气体^[23-24]。本文以新钻油气预探井和天然气水合物试采井资料为基础,采集中侏罗统和上三叠统岩心样品,分析其有机地球化学指标,综合以前化验分析结果,系统对比中侏罗统和上三叠统有机地球化学特征,并对其生排烃能力进行评价;进一步探讨木里冻土区天然气水合物的气源类型,明确天然气水合物气源。若天然气水合物气源来自于下伏地层(三叠系、二叠系、石炭系),根据“源控论”的思想——有效烃源岩分布范围控制着油气田的大致分布范围,那么研究区天然气水合物将不再局限于

木里冻土区,而是扩大到整个南祁连盆地。但研究认为,木里冻土区天然气水合物来源为淡水环境中形成的有机热解成因气,且为成熟度处于生油或凝析油高峰期的原油伴生气。中侏罗统烃源岩特征与之基本一致,为天然气水合物主力生烃层系,而上三叠统烃源岩有机质成熟度高,生烃潜量差,对天然气水合物成藏贡献不大。在南祁连盆地勘查天然气水合物的重点区域优选中应着重考虑侏罗系的展布情况。

1 基本地质特征

南祁连盆地地处青藏高原东北缘,祁连山南部,北侧与广泛发育前寒武系的中祁连山体相邻,南部以宗务隆山与柴达木盆地相邻。区域上自震旦纪以来,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。盆地被分割为多个近北西向展布的拗陷,从西向东依次为哈拉湖拗陷、疏勒拗陷、下日哈拗陷和木里拗陷(图1)。

木里冻土区位于木里拗陷内,地理位置处于青海省北部高寒地区,青海湖以北、祁连山南麓的狭长区域内,海拔4100~4300m,年平均气温-5.1℃。木里拗陷内多年冻土层广泛发育,冻土层呈岛状分布,平均厚度约80m,相当一部分地区多年冻土层厚度大于100m^[26]。

由于构造作用和盆地演化,该拗陷自下而上发育4套烃源岩:石炭系暗色泥(灰)岩、下二叠统草地沟组暗色灰岩、上三叠统尕勒得寺组暗色泥岩、侏罗系暗色泥页岩,并普遍缺失上白垩统和古近系。侏罗系含煤岩系是木里煤田主要的勘探开采层位,煤田主体包括聚乎更矿区、弧山矿区、江仓矿区、热水矿区等,呈NWW—SEE向斜列展布。研究区地处青海省天峻县木里镇境内,位于木里煤田聚乎更矿区。矿区总体上为一复式背斜构造,由1个大背斜和2个小向斜组成,其中北向斜分布有三井田、二井田和—露天3个井田,南向斜由四井田、—井田、三露天和二露天组成。天然气水合物钻探井及油

气钻探参数井位于南向斜的三露天井田内,出露地层主要包括第四系、中侏罗统和上三叠统(图1)。其基底为上三叠统,广泛出露于矿区南部和背斜轴部,岩性以浅灰色粉砂岩、黑色泥岩油页岩及薄煤层为主,与上覆侏罗系呈平行不整合接触。研究区出露的地层除第四系外,主要包括中侏罗统江仓组 and 木里组^[27-28],以及部分上三叠统。其中,该区中侏罗统为含煤地层,是在温暖湿润、还原环境中沉积的一套山间河湖沼泽相含煤碎屑岩建造。

2 样品采集与分析概况

本次在南祁连盆地木里冻土区共采集到3个钻井的岩心样品,分别为木参1井、木参2井和SK-0井(图1)。以上钻井岩心样品均来自中侏罗统江仓组、木里组和上三叠统尕勒得寺组。其中,木参1井共采集烃源岩岩心样品16件,岩屑样品27件;木参2井烃源岩岩心样品12件,岩屑样品29件;SK-0井烃源岩岩心样品22件,共进行化验分析511样次。主要针对总有机碳含量(TOC)、生油岩热解(Rock Eval)、氯仿沥青“A”、族组分、干酪根有机显微组分、镜质组反射率等项目进行了分析。其中,总有机碳含量测试依据GB/T19145-2003标准,检测仪器为

美国力克公司CS-230碳硫测定仪,测试条件为常温常压;热解测试依据GB/T18602-2012标准,检测仪器为OGE-II岩石热解仪,测试条件为温度20℃,湿度40%;干酪根分离鉴定依据GB/T19144-2010标准,使用仪器为LXJ-II离心沉淀机、烘箱,测试条件为常温常压;干酪根类型鉴定依据SY/T5125-1996标准,使用仪器为LEICA DM-4500P研究型显微镜,测试条件为温度25℃,湿度65%;镜质体反射率的测定依据SY/T5154-2012标准,使用仪器为DMLP with MSP200镜质体反射率测定仪,测试条件为温度23℃,湿度50%;干酪根元素分析依据SY/T 5122-1986标准,使用仪器为美国CE-440有机元素分析仪,精度满足0.1%要求;干酪根C同位素鉴定依据GB/T18340.2-2010标准,使用仪器为DELTA V ADV同位素质谱仪,系统稳定性小于 10×10^{-6} ;氯仿沥青“A”测定依据SY/T5118-2005标准,使用仪器为YS全自动多功能抽提仪。

3 烃源岩有机地球化学特征

在勘探早期,一般从有机质丰度、有机质类型、有机质成熟度及烃源岩生烃潜量4个方面对其进行定性和定量评价。结合研究区3口井岩心样品

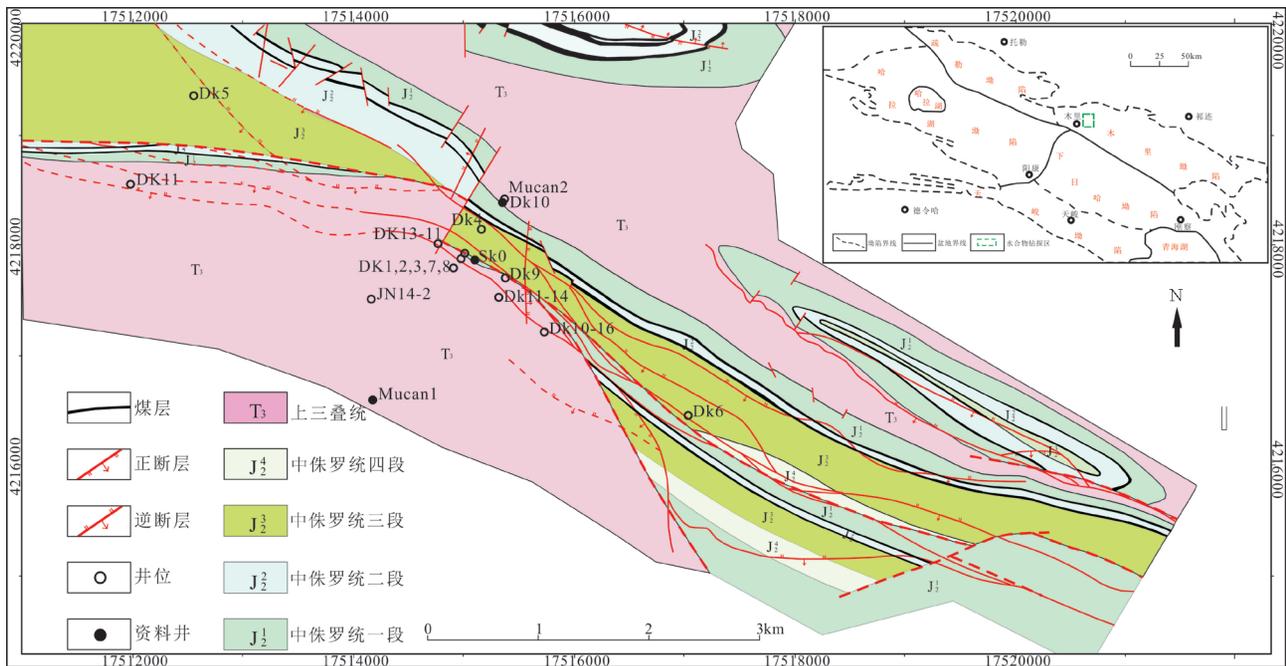


图1 南祁连盆地构造单元划分及木里冻土区井位地质图^[23]

Fig. 1 Division of tectonic units in southern Qilian Basin and geological map of wells in Muli permafrost area

的化验分析结果,从以上 4 个方面对比中侏罗统和上三叠统尕勒得寺组烃源岩特征,初步判断,南祁连盆地木里冻土区天然气水合物的主要烃源岩为中侏罗统江仓组、木里组,上三叠统尕勒得寺组烃源岩生排烃能力较差,对天然气水合物成藏贡献不大。

3.1 有机质丰度

岩石中有机质的数量决定着烃类的生成量,精确测定有机质数量是评价烃源岩的关键。本文直接测定烃源岩的总有机碳含量、可溶有机质含量和总烃含量,并结合烃源岩的其他特征,建立一系列适用于各种不同类型烃源岩的有机质数量指标评价体系。

3.1.1 有机碳含量

有机碳含量是评价烃源岩有机质丰度最有效的指标。以有机碳含量 0.4%、0.6%、1.0%、2.0% 作为评价分界点^[29-30],将泥岩和油页岩分为非、差、中等、好、很好 5 个级别。本次共测试 TOC 114 样次(收集以往资料 37 样次),其中中侏罗统样品 71 样次,上三叠统样品 43 样次。从有机碳含量分布情况看,中侏罗统 TOC 含量较高(图 2),几乎所有样品都大于 0.4%,无非烃源岩样品,TOC 大于 1% 的样品占总数的 78.9%,大于 2% 的样品占总数的 49.7%。总之,中侏罗统烃源岩为好和很好烃源岩。所有上三叠统样品 TOC 都大于 0.4%,无非烃源岩样品,样品 TOC 含量主要分布在 1%~2% 之间,占样品总数的 66.7%,大部分为好烃源岩样品,仅 4 个样品大于 2%。从总有机碳含量看,中侏罗统烃源岩明显优于上三叠统烃源岩。

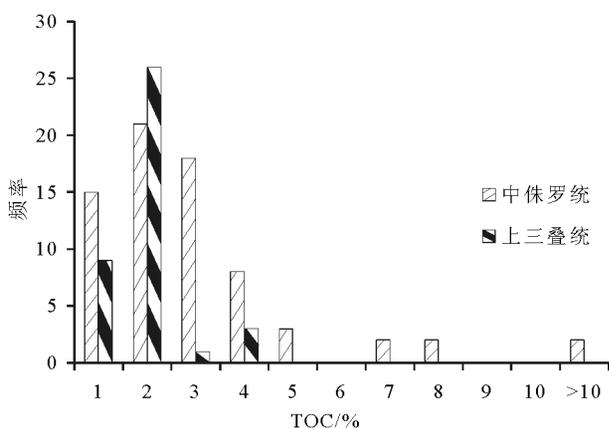


图 2 研究区有机碳含量分布频率

Fig. 2 TOC distribution frequency histogram in the study area

3.1.2 氯仿沥青“A”含量

氯仿沥青“A”是用氯仿从岩石中抽提出的有机质,为油气运移后的剩余部分,其含量的高低能反映出烃源岩的生烃能力。以氯仿沥青“A”含量 0.01%、0.05%、0.1% 作为评价分界点^[27-28],将泥岩和油页岩分为非、差、中等、好 4 个级别。本次共测试氯仿沥青“A”35 样次,中侏罗统样品 18 样次,上三叠统样品 17 样次。从氯仿沥青“A”分布情况看,中侏罗统氯仿沥青“A”含量较高(图 3),所有样品都大于 0.01%,无非烃源岩样品,其中氯仿沥青“A”大于 0.1% 的样品占总数的 72.2%,为非常好的烃源岩。上三叠统所有样品氯仿沥青“A”分析结果均小于 0.05%,其中小于 0.01% 的非烃源岩样品占总数的 41.2%,介于 0.01~0.05% 之间的差烃源岩样品占样品总数的 58.8%,大部分为差烃源岩或非烃源岩。氯仿沥青“A”分析结果显示,中侏罗统为好的烃源岩,而上三叠统尕勒得寺组烃源岩为差烃源岩或非烃源岩。

3.2 有机质类型

有机质丰度是烃源岩的一个数量指标,而有机质类型是一个质量指标,不同类型干酪根的生烃潜力不同,形成产物也不同。I、II 型干酪根生烃潜力大,形成产物以石油为主,III 型干酪根生烃潜力较小,形成产物以天然气为主。因此,有机质类型

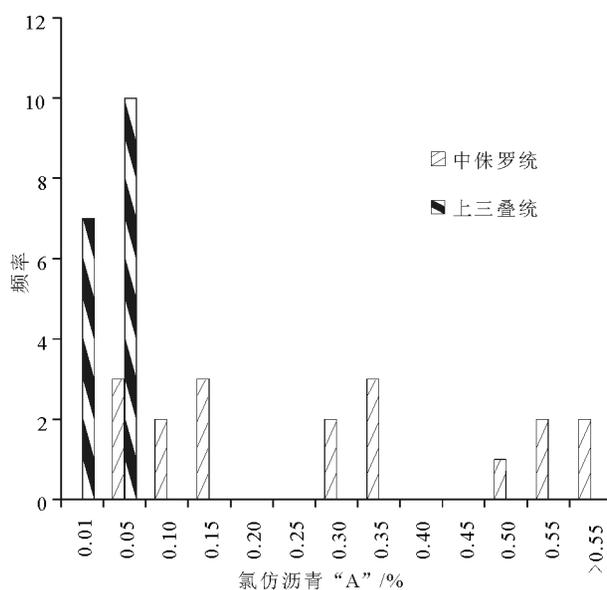


图 3 研究区氯仿沥青“A”分布直方图

Fig. 3 Middle Jurassic chloroform bitumen 'A' distribution frequency histogram in the study area

是评价烃源岩好坏的另一个重要方面。判别有机质类型以分析干酪根的类型为主,对干酪根进行分类主要通过其显微组分、化学元素分析、族组分、氢指数、氧指数等指标进行判别(表1)。

3.2.1 干酪根镜检显微组分

干酪根的类型主要由4种组分决定,分别是腐泥组、壳质组、镜质组与惰质组,如果镜质组与惰质组含量较高,则干酪根的类型较差;反之,如果腐泥组、壳质组含量较高,则具备较好的干酪根类型。根据这4种组分的含量计算出类型指数TI来判别有机质类型,计算公式为: $TI=100A+50B-75C-100D$,式中,A、B、C和D分别表示腐泥质、壳质组、镜质组和惰质组。从计算结果统计看,在中侏罗统和上三叠统没有出现最具有生油潜量的I型干酪根(图4),而是以II₁、II₂和III型干酪根为主。中侏罗统总体以II₂型干酪根为主,占总干酪根类型的50%,其次为II₁型干酪根,III型干酪根类型最少,仅占18.75%。上三叠统干酪根以III型最多,占干酪根类型的41%,其次为II₁型干酪根,II₂型干酪根类型最少,约占20%。总体看,中侏罗统和上三叠统干酪根类型差别不大,反映沉积环境差别较小,具有基本相同的烃源岩母质来源。

3.2.2 干酪根化学元素组成及其分类

不同类型的干酪根化学元素的含量不同,用元素分析测定干酪根的元素组成,计算出干酪根的H/C原

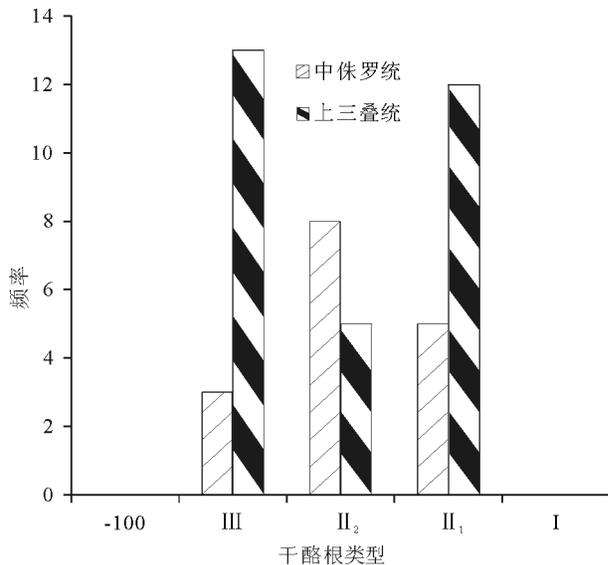


图4 研究区干酪根类型分布直方图

Fig. 4 Middle Jurassic kerogen type distribution frequency histogram in the study area

表1 烃源岩有机质类型划分评价标准^[11]

Table 1 Evaluation criteria for classification of organic matter in source rocks

类别	类型	热解参数		化学元素		族组分	显微组分
		IO	HI	H/C	O/C	饱/芳	指数(TI)
I	腐泥	<20	>600	>1.4	<0.1	>3	80~100
II ₁	腐植腐泥	20~40	250~600	1.1~1.4	0.1~0.15	1.6~3	40~80
II ₂	腐泥腐植	40~60	120~250	0.8~1.1	0.15~0.25	1~1.6	0~40
III	腐植	>60	<120	<0.8	>0.25	0.5~1	-100

子比和O/C原子比,将相应的数据投在标准的范一克罗维伦坐标图上,即可确定其有机质的类型。研究区干酪根主要为II型和III型干酪根(图5),极少样品落入I型干酪根范围。整体上,中侏罗统与上三叠统O/C原子数比值差异不大,中侏罗统9个样品和上三叠统18个样品的平均值都为0.09。而H/C原子数比值差异较大,中侏罗统样品平均值为0.83,明显高于平均值为0.64的上三叠统,二者干酪根类型略有差异,但上三叠统部分烃源岩成熟度较高,对烃源岩有机质类型的确定存在偏差。

3.2.3 氢指数HI与T_{max}交汇分类

用Rock-Eval热解分析方法直接测定出岩石中的吸附烃、干酪根热解烃、二氧化碳等含氧挥发组分的含量及相应的温度,并根据有机碳含量算出其氢指数和氧指数,氢指数与氧指数相结合,不但可

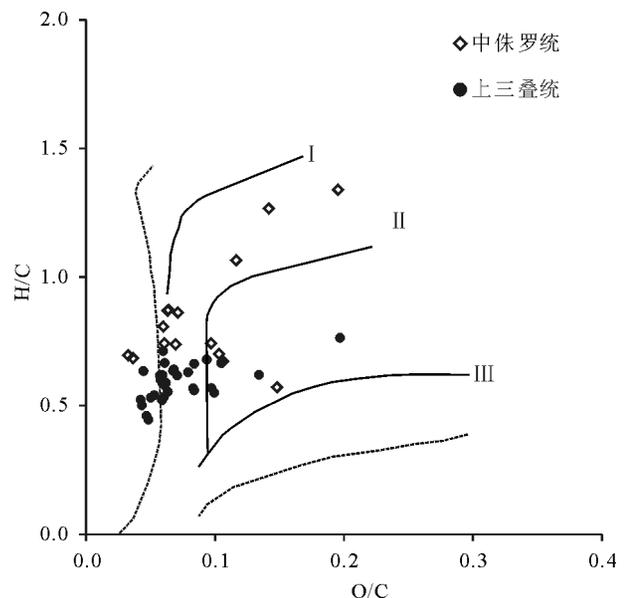


图5 研究区干酪根化学元素分类

Fig. 5 Plot of O/C to H/C of the samples in the study area

以评价生油岩的质量,划分生油岩的类型指标,而且是研究生油岩成熟度的指标。在生油岩埋藏深度接近生油门限时,生油岩有机质的氧含量已趋稳定,在超过生油门限后,随着埋藏深度的增加,干酪根热降解使有机质中的氢含量迅速下降,氢指数也急速变小,在氢指数 HI 与 T_{max} 交汇图上投点分析烃源岩干酪根类型是另一种判断干酪根类型的方法。中侏罗统烃源岩主要分布在 II 型干酪根范围内(图 6),少量分布在 I 型干酪根范围,而上三叠统因成熟度较高,主要分布于 III 型干酪根范围内。

上述各种方法在确定烃源岩的有机质类型时都有各自的优点和不足,通常是将上述各种方法综合起来,相互取长补短,来确定烃源岩的有机质类型(表 2)。总体上,中侏罗统有机质类型以 II₂、II₁ 型为主,而上三叠统有机质类型以 III、II₁ 型为主。

3.3 有机质热演化程度

烃源岩中有机质的成熟度是烃类形成的关键因素,判别指标有干酪根的镜质体反射率(R_o)、岩石热解峰温度(T_{max})、热变指数(TAI)、干酪根红外光

谱、孢粉颜色指数(SCI)、奇偶优势指数(OEP)、可溶有机质的演化、生物标志化合物等^[32-33]。

泥岩、油页岩的镜质体反射率测定结果显示:所有样品 R_o 值均大于 0.7%(图 7),中侏罗统烃源岩 R_o 值介于 0.7%~1.24%之间,上三叠统烃源岩 R_o 值介于 1.12%~1.77%之间。依据中国石油天然气总公司 1995 年发布的行业标准,将有机质热演化程度分为 5 个阶段,即未成熟阶段、低成熟阶段、成熟阶段、高成熟阶段、过成熟阶段,分别对应镜质体反射率(R_o) < 0.5%, 0.5%~0.7%, 0.7%~1.2%, 1.2%~2.0%, > 2.0%。中侏罗统烃源岩正处于有机质成熟阶段,为生油高峰期和生湿气阶段,在原油生成的过程中,产生大量的原油伴生气。上三叠统处于有机质高成熟阶段,以生干气为主。

中侏罗统烃源岩镜质体反射率 R_o 值与深度相关性较好(图 7),其相关系数 R^2 为 0.8,而上三叠统烃源岩镜质体反射率 R_o 值与深度相关性差,其相关系数 R^2 仅为 0.4,样品点分散,相同深度样品 R_o 值明显大于中侏罗统。其趋势线也明显向高 R_o 值方向偏移,主要受断层逆推作用影响。同时断层的逆推

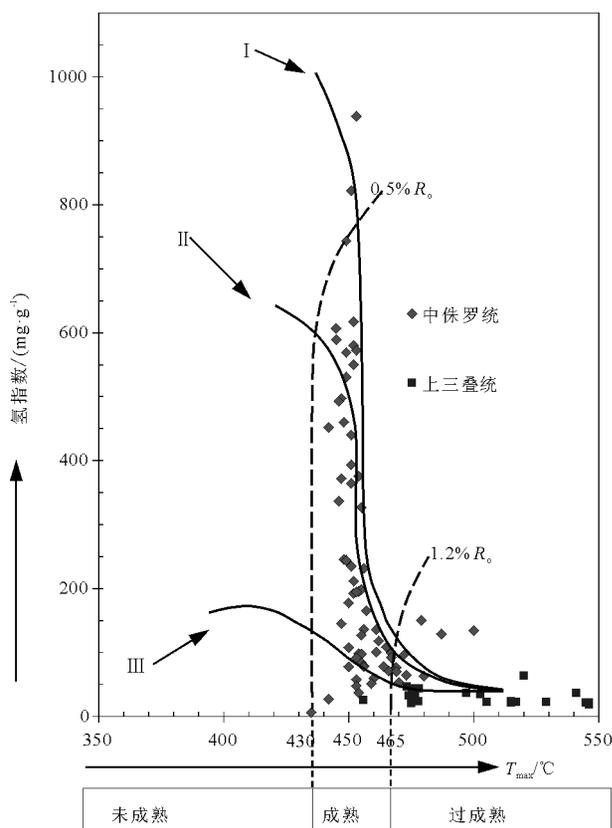


图 6 研究区烃源岩样品热解氢指数与 T_{max} 交汇图

Fig. 6 The plot of T_{max} to HI of the samples in the study area

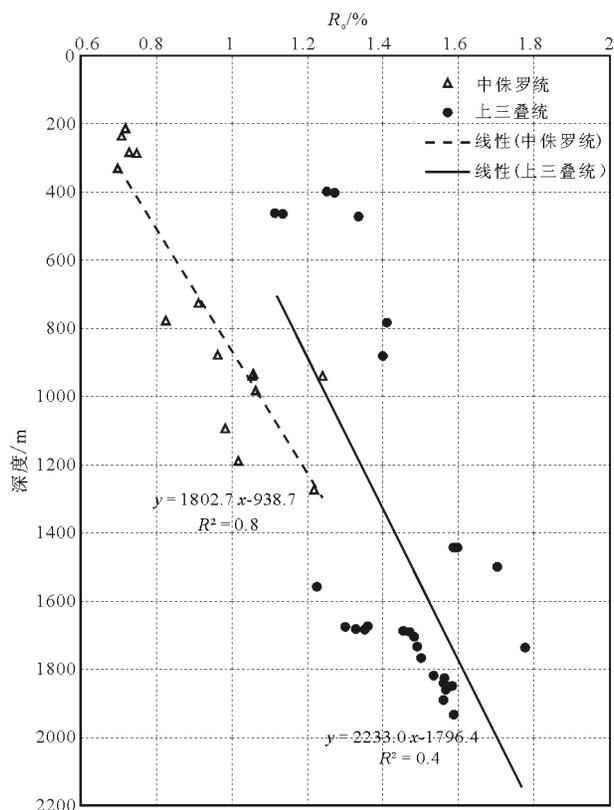


图 7 研究区镜质体反射率 R_o 与深度关系

Fig. 7 Plot of R_o to depth in the study area

表2 研究区烃源岩有机质类型综合评价
Table 2 Comprehensive evaluation of organic matter
types of source rocks in the study area

井名	深度/m	层位	显微组分类型指数(TI)					化学元素		热解参数氢指数 (HI)/(mg·g ⁻¹)	综合评价
			腐泥质/%	壳质组/%	镜质组/%	惰质组/%	类型指数	H/C	O/C		
木参1井	724~725	J	9.0	61.0	24.0	6.0	16.0	0.7	0.1	71.2	II ₂
木参1井	776~777	J	9.0	52.0	32.0	7.0	4.0	0.6	0.1	77.9	II ₂
木参1井	876~877	J	6.0	69.0	21.0	4.0	21.0	0.9	0.1	135.9	II ₂
木参1井	931~932	J	3.0	70.0	26.0	1.0	18.0	0.6	0.2	33.0	II ₂
木参1井	938~939	J	14.0	74.0	11.0	1.0	42.0	0.7	0.1	70.1	II ₁
木参1井	981~982	J	16.0	76.0	8.0		48.0	0.8	0.1	91.7	II ₁
木参1井	1092~1093	J	9.0	76.0	15.0		36.0	0.7	0.1	96.4	II ₂
木参1井	1187~1188	J	3.0	54.0	41.0	2.0	~3.0	0.7	0.0	150.2	III
木参1井	1272~1273	J	4.0	72.0	22.0	2.0	22.0	0.7	0.0	128.8	II ₂
SK~0井	212.39	J	0.0	79.0	20.5	0.6	25.4	0.9	0.1	194.8	II ₂
SK~0井	234.4	J	11.3	70.6	17.6	0.5	41.6	1.1	0.1	375.5	II ₁
SK~0井	282.16	J	23.9	64.8	11.0	0.3	47.7	1.3	0.1	530.5	II ₁
SK~0井	285.48	J	14.8	68.1	17.0	0.0	43.1	1.3	0.2	569.1	II ₁
SK~0井	330	J	2.2	63.3	33.3	1.2	12.7	0.9	0.1	211.6	II ₂
木参1井	939.16	J	1.3	28.2	68.0	2.6	~37.8	0.7	0.1	108.3	III
木参2井	70	J	1.1	30.7	67.6	0.6	~32.1	0.6	0.1		III
木参1井	1566~1567	T3g	14.0	69.0	14.0	3.0	35.0	0.6	0.1	63.6	II ₂
木参1井	1676~1677	T3g	27.0	67.0	6.0		56.0	0.5	0.1	36.1	II ₁
木参1井	1678~1679	T3g	25.0	68.0	5.0	2.0	53.0	0.7	0.1	17.0	II ₁
木参1井	1685	T3g	40.0	55.0	4.0	1.0	64.0	0.7	0.1	22.8	II ₁
木参1井	1686~1687	T3g	41.0	55.0	4.0		66.0	0.6	0.1	23.0	II ₁
木参1井	1689~1690	T3g	43.0	48.0	7.0	2.0	60.0	0.6	0.1	19.0	II ₁
木参1井	1692~1693	T3g	37.0	56.0	6.0	1.0	60.0	0.6	0.1	21.4	II ₁
木参1井	1705~1707	T3g	44.0	53.0	3.0		68.0	0.6	0.1	18.1	II ₁
木参1井	1730~1734	T3g	39.0	59.0	2.0		67.0	0.6	0.1	13.9	II ₁
木参1井	1765~1766	T3g	19.0	75.0	5.0	1.0	52.0	0.7	0.1	21.1	II ₁
木参1井	1814~1815	T3g	7.0	63.0	25.0	5.0	15.0	0.5	0.0	17.1	II ₂
木参1井	1821~1822	T3g	14.0	70.0	15.0	1.0	37.0	0.5	0.1	15.4	II ₂
木参1井	1835~1836	T3g	8.0	65.0	25.0	2.0	20.0	0.7	0.1	22.7	II ₂
木参1井	1843~1844	T3g	4.0	66.0	22.0	8.0	13.0	0.6	0.1	13.4	II ₂
木参1井	1846~1847	T3g	15.0	76.0	7.0	2.0	46.0	0.6	0.1	15.2	II ₁
木参1井	1854~1855	T3g	15.0	79.0	5.0	1.0	50.0	0.5	0.1	14.8	II ₁
木参1井	1883~1884	T3g	19.0	74.0	5.0	2.0	50.0	0.6	0.0	14.2	II ₁
木参1井	1923~1924	T3g	6.0	52.0	36.0	6.0	-1.0	0.6	0.1	11.9	III
木参1井	1503.97	T3g	1.2	25.6	71.7	1.5	-41.2	0.5	0.0	21.9	III
木参1井	2002.63	T3g	0.0	11.0	87.4	1.6	-61.4	0.5	0.0	4.5	III
木参1井	2004.03	T3g	0.0	39.4	59.3	1.3	-26.1	0.4	0.0	25.1	III
木参2井	399.94	T3g	0.6	32.8	66.7	0.0	-33.1	0.7	0.1	29.9	III
木参2井	403.24	T3g	2.0	32.2	64.9	0.9	-31.5	0.6	0.1	34.5	III
木参2井	878.6	T3g	10.1	27.0	62.0	0.9	-23.0	0.6	0.1	43.0	III
木参2井	1450.02	T3g	0.3	37.6	61.8	0.3	-27.5	0.6	0.1	21.9	III

作用使得上三叠统烃源岩的温压条件发生较大变化,从而导致生排烃能力下降,总体对天然气水合物成藏贡献较小。

另外,氢指数HI与 T_{\max} 交会图(图6)表明,中侏罗统烃源岩的 T_{\max} 多处于435~465℃之间,整体处于成熟生油阶段,而上三叠统烃源岩 T_{\max} 多大于465℃,部分样品大于575℃,处于高成熟、过成熟阶段。这一结果与镜质体反射率的测定结果一致。

3.4 烃源岩生烃潜能评价

岩石热解参数——生烃潜能(S1+S2)是衡量烃源岩生油生气能力的重要指标,可以更加直接和客观地体现烃源岩的生烃能力。生烃潜能用来表示单位质量烃源岩的产油潜能,其中,S1表示岩石中游离烃的热蒸发量,S2表示有机质的热解烃量。以生烃潜能值2mg/g、6mg/g、20mg/g为评价分界点,将泥岩和油页岩分为差、中等、好、最好4个级别。生烃潜能与总有机碳含量(TOC)的交会图显示(图8),中侏罗统烃源岩大部分样品的总有机碳含量高,多大于1%,生烃潜能大于2mg/g,71个样品生烃潜能均值为8.8mg/g,属于中等到最好样品级别,为潜在或有效的烃源岩。而上三叠统烃源岩TOC多处于1%~3%之间,总体有机碳含量较高,但生烃潜能多低于1mg/g,本次分析的39个样品测试结果均值仅为0.35mg/g,属于非烃源岩到差烃源岩的范围。

4 天然气水合物成因类型

刘昌岭等^[23]、贺行良等^[24]采集研究区天然气水合物岩心实物样品26个,采用真空顶空法收集样品中水合物的分解气,分别用气相色谱(GC)、气相色谱同位素比值质谱(GC-IRMS)测定气体成分和同位素组成。测试结果表明,研究区天然气水合物样品的气体C同位素变化较大,甲烷、乙烷和丙烷的C同位素($\delta^{13}\text{C}$)变化范围分别为-58.04‰~-39.5‰、-38.97‰~-30.7‰和-34.7‰~-21.2‰,而二氧化碳的C同位素($\delta^{13}\text{C}$)最低为-27.9‰,最高为16.7‰;甲烷、乙烷和丙烷的H同位素(δD)变化范围分别为-285‰~-225‰、-285‰~-228‰和-253‰~-179‰。通过对C、H同位素综合研究,刘昌岭等^[23]、贺行良等^[24]认为,研究区天然气水合物的气体主要来源于热解气,且是在淡水环境中形成

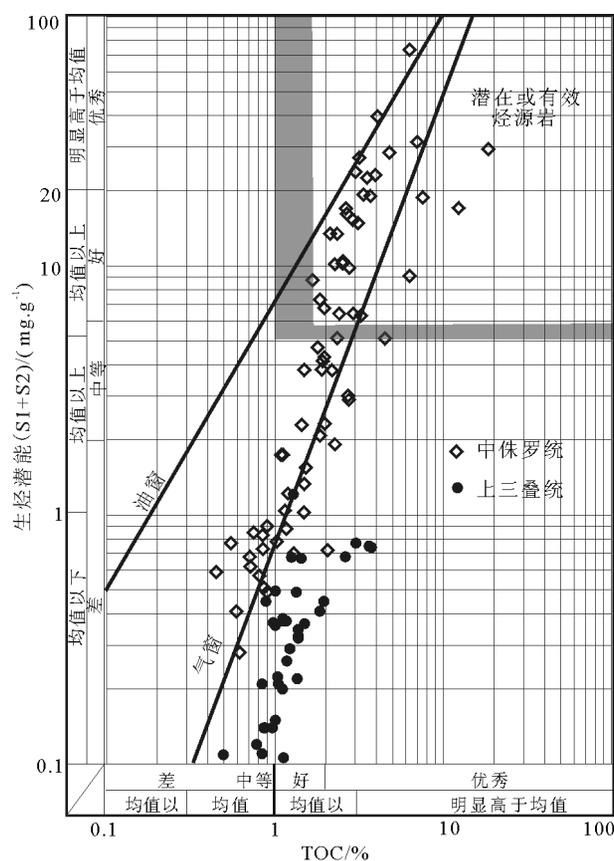


图8 研究区烃源岩样品总有机碳含量(TOC)与生烃潜能(S1+S2)投点

Fig. 8 Plot of TOC to hydrocarbon potential (S1+S2) in source rock of the study area

的有机成因气。将上述分析结果进行 $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$ 与 $\delta^{13}\text{C}_1$ ‰交汇(图9),采用戴金星^[34]的天然气成因划分标准进行投点,结果显示,除DK8-19井浅层岩心烃类气体可能含有少量亚生物成因气外,其余各井所有样品均位于原油伴生气区,故研究区天然气水合物气体主要为原油伴生气。中侏罗统烃源岩处于生油高峰期和生湿气阶段,产生大量原油伴生气,为天然气水合物主力生烃层系,而上三叠统烃源岩有机质成熟度高,生烃潜能差,对天然气水合物成藏贡献不大。

5 结论

(1)中侏罗统烃源岩有机质丰度较高,TOC含量大于1%的样品占78.9%;氯仿沥青“A”大于0.1%的样品占总数的72.2%;有机质类型以II₂型为主;镜质体反射率 R_o 多介于0.7%~1.2%之间;氢指数HI均

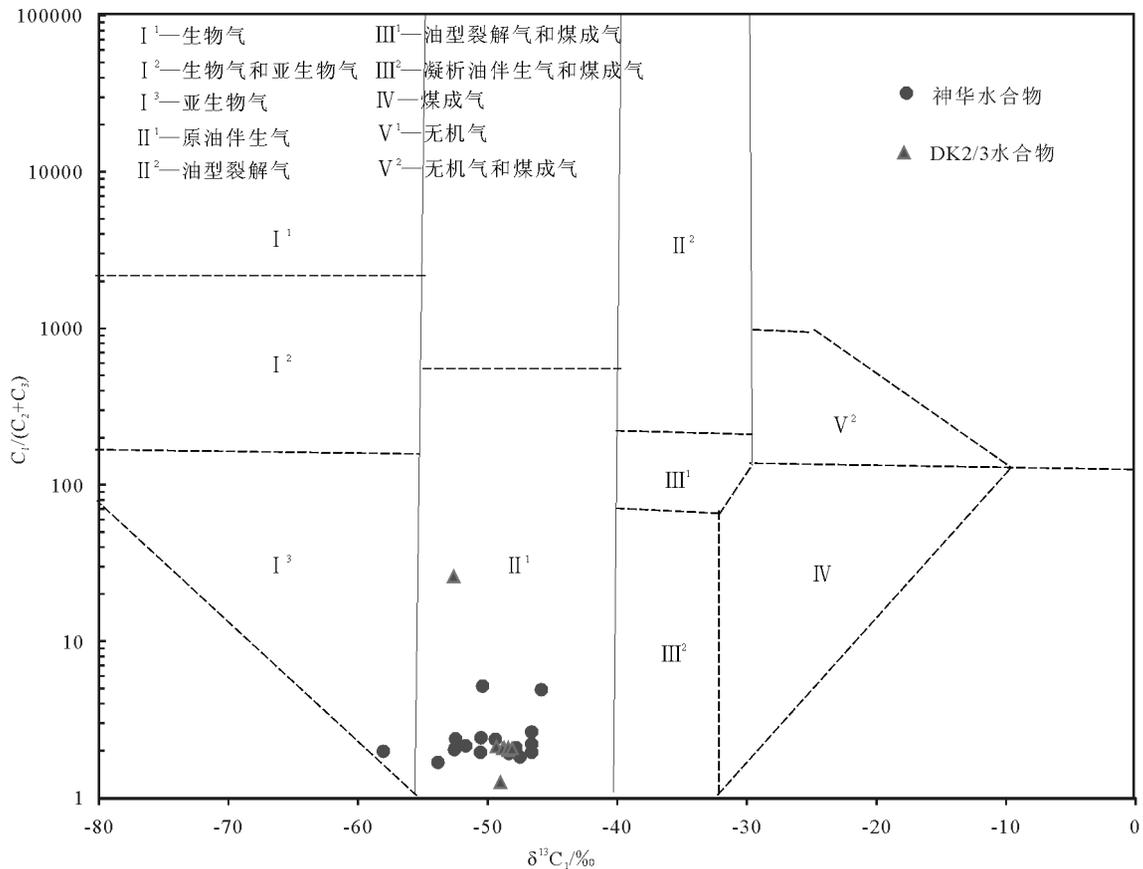


图9 研究区天然气水合物样品不同成因烃类气体鉴别

图9 Identification of hydrocarbon gases from gas hydrate samples in the study area

值为 256mg/g; 生烃潜量(S1+S2)均值为 8.8mg/g, 总体处于生烃高峰期的生油阶段或凝析油阶段, 属于好、很好烃源岩。

(2) 上三叠统尕勒得寺组亦为煤系地层烃源岩, TOC 含量大于 1% 的样品占总数的 76.9%, 氯仿沥青“A”小于 0.05%, 有机质类型以 III 型为主; 镜质体反射率 R_o 介于 1.1%~2.4% 之间; 总体处于生湿气或干气阶段, 但由于构造抬升, 其氢指数 HI 平均值仅 21.5mg/g; 生烃潜量(S1+S2)平均值仅 0.35mg/g, 整体生、排烃能力较差, 为较差烃源岩。

(3) 研究区天然气水合物来源为淡水环境中形成的有机热解成因气, 且为成熟度处于生油或凝析油高峰期的原油伴生气。中侏罗统烃源岩特征与之基本一致, 生烃潜力大, 为天然气水合物的主力生烃层系, 而上三叠统烃源岩有机质成熟度高, 生烃潜量差, 对天然气水合物成藏贡献不大, 故下一步在南祁连盆地勘查天然气水合物的重点区域优

选中应着重考虑侏罗系的展布情况。

致谢: 成文过程中得到中国地质调查局油气资源调查中心翟刚毅教授级高工的指导, 在此深表谢意。

参考文献

- [1] Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(11/12): 997-1008.
- [2] 史斗, 郑军卫. 世界天然气水合物研究开发现状和前景[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 330-339.
- [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] 张洪涛, 祝有海. 中国冻土区天然气水合物调查研究[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1809-1815.
- [5] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [6] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas hydrates: A potential energy source for 21st Century[J]. Journal of Petroleum Sci-

- ence and Engineering, 2007, 56:14-31.
- [7]张立薪,徐学祖,马巍.青藏高原多年冻土与天然气水合物[J].天然气地球科学,2001,12(1):22-26.
- [8]黄朋,潘桂棠,王立全,等.青藏高原天然气水合物资源预测[J].地质通报,2001,21(11):794-798.
- [9]伊海生,时志强,刘文均.青藏高原多年冻土区天然气水合物形成潜力及远景[J].西藏地质,2002,14(1):45-52.
- [10]刘怀山,韩晓丽.西藏羌塘盆地天然气水合物地球物理特征识别与预测[J].西北地质,2004,37(4):33-38.
- [11]陈多福,王茂春,夏斌.青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测[J].地球物理学报,2005,48(1):165-172.
- [12]吴青柏,蒋观利,蒲毅彬,等.青藏高原天然气水合物的形成与多年冻土的关系[J].地质通报,2006,25(1/2):29-33.
- [13]坚润堂,李峰,王造成.青藏高原冻土区活动带天然气水合物异常特征[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(2):13-17.
- [14]祝有海,赵省民,卢振权.中国冻土区天然气水合物的找矿选区及其资源潜力[J].天然气工业,2011,31(1):13-19.
- [15]祝有海,张永勤,文怀军.祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程概况[J].地质通报,2011,30(12):1816-1822.
- [16]祝有海,卢振权,谢锡林.青藏高原天然气水合物潜在分布区预测[J].地质通报,2011,30(12):1918-1926.
- [17]曹代勇,王丹,李靖,等.青海祁连山冻土区木里煤田天然气水合物气源分析[J].煤炭学报,2012,37(8):1364-1368.
- [18]王佟,刘天绩,邵龙义,等.青海木里煤田天然气水合物特征与成因[J].煤田地质与勘探,2009,37(6):26-30.
- [19]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.
- [20]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分的特征和成因[J].地质通报,2011,30(12):1851-1856.
- [21]翟刚毅,卢振权,卢海龙,等.祁连山冻土区天然气水合物成矿系统[J].矿物岩石,2014,34(4):79-92.
- [22]卢振权,唐世琪,王伟超,等.青海木里三露天冻土天然气水合物气源性质研究[J].现代地质,2015,29(5):995-1001.
- [23]刘昌岭,贺行良,孟庆国,等.祁连山冻土区天然气水合物分解气碳氢同位素组成特征[J].岩矿测试,2012,31(3):489-494.
- [24]贺行良,刘昌岭,孟庆国,等.青海聚乎更钻探区含水合物岩心气体组成及其指示意义[J].现代地质,2015,29(5):1194-1200.
- [25]谢其峰,周立发,马国福,等.南祁连盆地三叠系烃源岩有机地球化学特征[J].北京大学学报(自然科学版),2011,47(6):1034-1040.
- [26]潘语录,田贵发,栾安辉,等.测井方法在青海木里煤田冻土研究中的应用[J].中国煤炭地质,2008,20(12):7-9.
- [27]文怀军,鲁静,尚潞君,等.青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系层序地层研究[J].中国煤田地质,2006,18(5):19-21.
- [28]青海省地质矿产局.青海省区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.
- [29]胡见义,黄第藩,徐树宝,等.中国陆相石油地质理论基础[M].北京:石油工业出版社,1991:1-322.
- [30]陈荣书.石油及天然气地质学[M].武汉:中国地质大学出版社,1994:1-262.
- [31]黄第藩,李晋超,周翥虹,等.陆相有机质演化和成烃机理[M].北京:石油工业出版社,1984:1-196.
- [32]梁世友,李凤丽,付洁,等.北黄海盆地中生界烃源岩评价[J].石油实验地质,2009,31(3):249-252.
- [33]龙华山,王绪龙,向才富,等.准噶尔盆地南缘侏罗系烃源岩评价[J].现代地质,2013,27(5):1070-1080.
- [34]戴金星.戴金星天然气地质和地球化学论文集(卷二)[M].北京:石油工业出版社,2000.