

doi: 10.12029/gc20200114

何梅兴, 方慧, 祝有海, 孙忠军, 胡祥云, 张鹏辉, 王小江, 裴发根, 仇根根, 杜炳锐, 吕琴音. 2020. 祁连山哈拉湖坳陷地质构造特征及天然气水合物成藏地质条件研究[J]. 中国地质, 47(1): 173–187.

He Meixing, Fang Hui, Zhu Youhai, Sun Zhongjun, Hu Xiangyun, Zhang Penghui, Wang Xiaojiang, Pei Fagen, Qiu Gengen, Du Bingrui, Lü Qinyin. 2020. A study of geological structural features of Hala Lake Depression in Qilian Mountain and reservoir-forming conditions of natural gas hydrate[J]. Geology in China, 47(1):173–187(in Chinese with English abstract).

祁连山哈拉湖坳陷地质构造特征 及天然气水合物成藏地质条件研究

何梅兴¹, 方慧¹, 祝有海², 孙忠军¹, 胡祥云³, 张鹏辉¹,
王小江¹, 裴发根¹, 仇根根¹, 杜炳锐¹, 吕琴音¹

(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. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 祁连山哈拉湖坳陷与已发现天然气水合物的木里坳陷同属于南祁连盆地次级坳陷, 有相似的水合物成藏条件, 但由于该区地质工作程度低, 坳陷内第四系覆盖层下的地质构造信息不清, 对该区的天然气水合物成藏条件缺乏认识。为查明哈拉湖坳陷的地质构造特征和天然气水合物成藏条件, 在哈拉湖坳陷区内开展了物化探综合探测及研究, 结果表明: (1) 调查区内可划分出 4 个凹陷区、2 个凸起区, 调查区内可划分出 26 条断裂; (2) 调查区永冻土层分布特征以新生界沉积区以大面积片状和基岩出露区以岛状分布为主, 永冻土层发育与高程、地形、地表覆盖层及表层土壤水分等因素密切相关; (3) 调查区发现了两处地球化学异常, 以酸解烃重烃、酸解烃干燥系数、顶空气甲烷和荧光光谱为指标组合, 显示了两种不同的异常特征类型, 异常浓集中心明显, 强度较高; (4) 哈拉湖坳陷的烃源岩条件相对差, 烃源岩的保存完整性和印支—燕山期圈闭构造是水合物成藏的关键, 哈拉湖坳陷区北部和地球化学 I 号异常区可为水合物成藏远景区。本文为南祁连盆地下一步天然气水合物资源调查与评价提供了依据。

关键词: 天然气水合物; 成藏条件; 冻土区; 温压条件; 哈拉湖坳陷; 祁连山; 油气地质调查工程

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)01-0173-15

A study of geological structural features of Hala Lake Depression in Qilian Mountain and reservoir-forming conditions of natural gas hydrate

HE Meixing¹, FANG Hui¹, ZHU Youhai², SUN Zhongjun¹, HU Xiangyun³, ZHANG Penghui¹,
WANG Xiaojiang¹, PEI Fagen¹, QIU Gengen¹, DU Bingrui¹, LÜ Qinyin¹

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang, 065000, Hebei, China;

2. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 3. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Both of the Hala Lake Depression in Qilian Mountain and the Muli Depression in which natural gas hydrate was found

收稿日期: 2019-01-30; 改回日期: 2019-08-23

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160224, DD20190030)、基本科研业务费项目(JYYWF20180902, AS2017Y05)联合资助。

作者简介: 何梅兴, 男, 1980 生, 高级工程师, 地球物理学专业, 主要从事油气地球物理勘探研究; E-mail: hemeixing@igge.cn。

are depressions of the South Qilian Basin and have similar hydrate accumulation conditions. However, due to the low degree of geological work in the Hala Lake Depression, the geological structure information in the depression under the Quaternary overburden is unclear, and the gas hydrate accumulation conditions in this area are not well understood. In order to find out the geological structure characteristics and gas hydrate accumulation conditions of the Hala Lake Depression, the authors carried out a comprehensive study of geophysical and geochemical exploration in the depression. Some conclusions have been reached: (1) The investigation area can be divided into four sags, two salients and twenty-six faults; (2) As for the distribution characteristics of permafrost layers in the investigation area, the Cenozoic sedimentary areas are mainly in sheet distribution in large area and the outcrops of bedrock are mainly in island-shaped distribution; the development of the permafrost layer is closely related to factors such as elevation, topography, land cover and surface soil moisture; (3) Two geochemical anomalies were found in the investigation area, and the indicators combination of heavy hydrocarbon in acidolysis hydrocarbons, aridity coefficient of acidolysis hydrocarbons, methane in headspace gases and fluorescence spectra characteristics indicates that there are two different types of anomalous features characterized by an obvious anomalous concentration center with relatively high intensity; (4) The source rocks in the Hala Lake Depression are relatively poor, and the preservation integrity of source rocks and the Indosinian-Yanshanian trap structure are the key factors to hydrate accumulation. The northern part of the Hala Lake Depression and the No. 1 geochemical anomaly zone can be the prospective areas for hydrate accumulation, and these findings provide a basis for future investigation and evaluation of the gas hydrate resources in the South Qilian Basin.

Key words: natural gas hydrate; reservoir-forming conditions; permafrost region; temperature-pressure conditions; Hala Lake Depression; Qilian Mountain; oil and gas geological survey project

About the first author: HE Meixing, male, born in 1980, senior engineer, mainly engages in petroleum geophysical exploration and research; E-mail: hemeixing@igge.cn.

Fund support: Supported by the program of China Geological Survey (No. DD20160224, DD20190030) and Fundamental Research Funds (No. JYYWF20180902, AS2017Y05).

1 引 言

天然气水合物是未来重要的清洁能源,资源储量巨大(Sloan et al., 2007),主要分布于大陆边缘陆坡及永久冻土带,如俄罗斯西伯利亚、加拿大马更些三角洲、美国阿拉斯加北部及北极群岛等地(Dallimore et al., 1998, 1999; Collett et al., 2000)。近年,中国在海域水合物调查中取得了一系列突破(王力峰等, 2017; 徐行等, 2017; 苏丕波等, 2017; 张伟等, 2018; 何健等, 2018)。而在陆域水合物方面,中国作为第三大冻土面积的国家,具备天然气水合物形成条件(张洪涛, 2007)。2000年前后,中国科学院等单位在青藏高原开展了少量的天然气水合物调查研究工作,显示青藏高原冻土区具有良好成藏条件(徐学祖等, 1999; 刘怀山等, 2004; 陈多福等, 2005; 吴青柏等, 2008)。2008年在青海祁连山木里地区取得了重大进展,天然气水合物实物样品在青藏高原冻土区首次钻获(祝有海等, 2009)。开采天然气水合物可作为国家未来优化能源结构具有重要意义,引起了社会各界广泛关注。从2001年至

今,中国地质调查局组织相关单位在西藏鸭湖、西藏戈木错、祁连山木里周边和东北漠河等地区开展了地质、地球物理及地球化学等综合调查研究工作,取得了许多成果及认识(王平康等, 2015, 2017; 方慧等, 2017)。

但除木里地区小范围内取得天然气水合物实物样品之外,青藏高原其他区域天然气水合物调查还未取得实质性突破,可能还需要较长的调查及研究历程。祁连山哈拉湖坳陷与木里坳陷有相似的天然气水合物成藏条件,同属于南祁连盆地次级凹陷,构造背景和储层条件相对较好,是天然气水合物调查的重点优选区(祝有海等, 2006; 卢振权等, 2009)。由于该区地质及地球物理工作程度较低,尤其是第四系覆盖层下的地质构造信息还缺乏认识,造成对该区的天然气水合物成藏条件认识不清。为了查明哈拉湖坳陷地质构造特征、冻土分布特征及天然气水合物异常标志,圈定天然气水合物成藏远景区,笔者在2014—2015年通过在该区开展的天然气水合物物化探综合调查,围绕天然气水合物成藏条件问题,重点分析地质构造、冻土分布及

地球化学特征。以天然气水合物成藏理论为基础,对比木里地区的天然气水合物成藏条件,探讨哈拉湖坳陷水合物成藏潜力,为该区天然气水合物资源评价提供依据。

2 地质背景

哈拉湖坳陷是南祁连盆地的次级坳陷,构造演化与南祁连盆地一致。坳陷处于南祁连盆地西部,大地构造位置位于疏勒南山以南、拜兴哈达隆起以北、阳康隆起以西和哈拉湖附近地区(曹洁等,2007;朱晓莉等,2013)。古生代早期,祁连山地区为夹于柴达木地块和华北大块之间的一个小洋盆。奥陶纪中晚期,北祁连洋盆地壳向南俯冲,南祁连盆地转变成成为弧后裂谷型盆地(向鼎璞,1982)。志留纪晚期,加里东运动使洋盆封闭、褶皱隆升剥蚀,南祁连地区转变成成为加里东褶皱带。石炭纪晚期,海水再次侵入,南祁连地区成为广阔的浅海陆棚沉积环境。二叠纪—三叠纪受海西运动影响,进入稳定的盆地盖层演化,坳陷内发育巨厚的海相—陆相沉积。晚三叠世末,受印支运动影响,坳陷抬升成为剥蚀区,缺失侏罗系和白垩系。喜山期,受印度板块向欧亚板块俯冲碰撞的远程效应的影响,坳陷内成为隆褶带,发育一系列逆冲断裂(冯益民,1997)。该区构造线为北西西方向为主,受碰撞造山作用影响,褶皱断裂发育。

哈拉湖坳陷缺失侏罗系和白垩系,自下而上包括了石炭系、二叠系和三叠系,石炭系仅分布在坳陷东北侧,二叠系和三叠系分布广泛,整体形状近似长方形,呈北西南东向展布,目前大部分地区被第四系覆盖。二叠系岩性主要由海陆交互相陆源碎屑岩和碳酸盐岩组成,三叠系岩性主要由石英砂岩和碳酸盐岩组成(张宝强,2017;杨利荣,2017)。

3 地球物理、地球化学调查

近年,地质科学院物化探研究所在祁连山木里水合物发现区开展了物化探方法技术攻关,实验的主要方法包括地震、音频大地电磁测深、高密度电法、低频探地雷达、综合地球物理测井、地球化学等,通过实验研究总结了冻土区天然气水合物地震学和电磁学识别标志,优选出了水合物地球化学勘查的有效指标(方慧,2017)。木里地区水合物储层

的地震反射波具有“高频”和“弱振幅”特征,反映水合物储层的中高阻异常带出现在气源通道(断裂)附近,水平中高阻异常带与地层产生的斜向低阻带存在的相交现象等特征(方慧,2017)。地气穿过永久冻土层垂向迁移和近地表表生地球化学作用为天然气水合物地球化学异常主要成因,地球化学勘查有效指标包括土壤酸解烃、顶空气、稀有气体、土壤热释烃、甲烷碳同位素等(孙忠军,2013)。

针对哈拉湖坳陷的地质构造及水合物烃类异常两个主要研究内容,采用物化探综合方法技术,主要包括音频大地电磁测深(AMT)、反射地震勘探及地球化学调查(图2)。音频大地电磁测深(AMT)和地球化学调查基本覆盖了哈拉湖坳陷,地震测线有两条,其中一条测线(DZ2)部署在哈拉湖东南部,另一条测线(DZ1)是以往油田部门以油气调查为目的的地震勘探测线,部署在哈拉湖西部。通过物化探方法的测量成果,结合已有的地质资料进行了综合研究。

3.1 音频大地电磁法

音频大地电磁测线主要部署在哈拉湖坳陷及周边(图2),共布置了45条测线,测线间距一般为3 km,在哈拉湖南部测线间距增大到5 km,测线总长度达到606.4 km,测区基本覆盖了坳陷范围。观测系统采用加拿大凤凰地球物理公司V5-2000大地电磁仪,采用正“十”形布设测量装置,同时测量天然电磁场5个分量(E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y 、 H_z),测点点距为100 m,观测频率范围为10~1 kHz。

音频大地电磁法(AMT)接收的信号为天然电磁场,为取得高质量测量数据,开工前进行了试验区采集参数试验,通过对比各采集时段的视电阻率与相位数据质量发现,下午至晚上时段区间的天然电磁场“死频带(10~1 kHz)”信号变得越来越强,选择中午13时以后的时段开展采集工作可获取高质量数据,如图3所示,按照天然电磁场的变化规律,野外均采集到了高质量数据。

利用加拿大凤凰公司的SSMT处理系统将电磁场时间序列进行频谱分析后得到功率谱,再估算出视电阻率及相位。为满足大地电磁TE和TM极化模式,假定地下介质以二维结构特征为主,将电性主轴角旋转至与哈拉湖地区构造走向NW-SE向一致,即测量坐标系逆时针旋转70°,计算出TE和TM

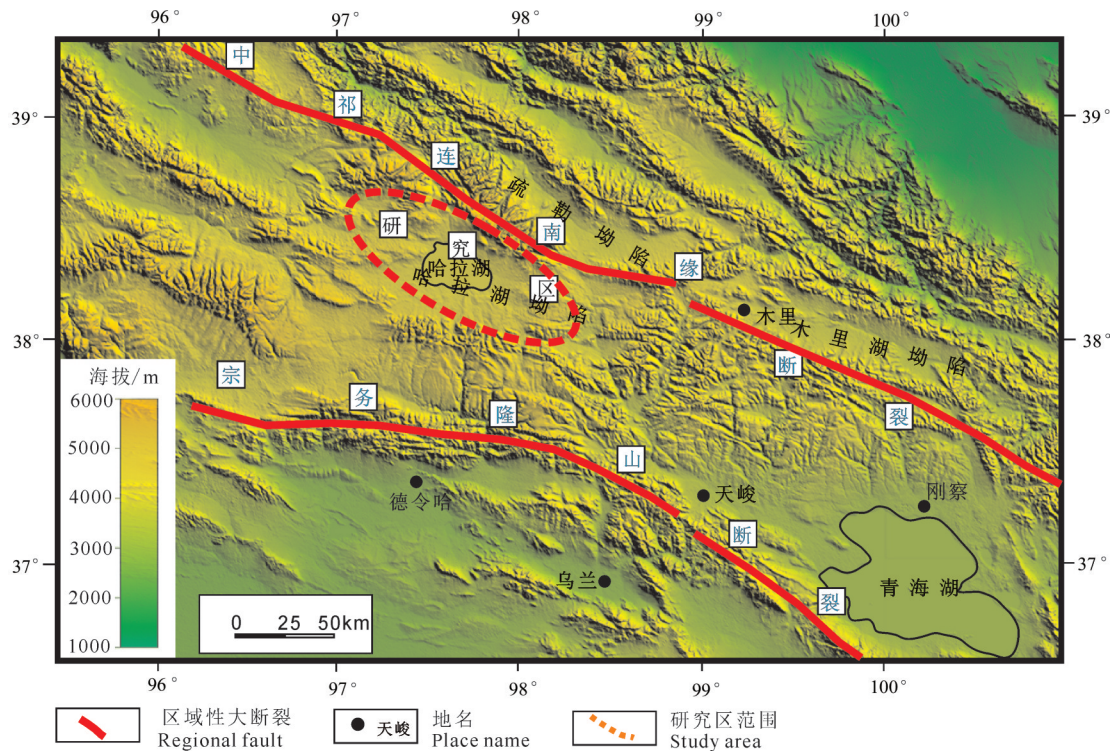


图1 哈拉湖地区大地构造概况图
Fig.1 An overview of geotectonics in the Hala Lake area



图2 哈拉湖坳陷综合物化探工作部署及地质概况图
Fig.2 Geological outline and deployment of comprehensive geophysical exploration work in the Hala Depression

极化模式的视电阻率和相位。由于大地电磁信号在某些频点或频段的信噪比低,视电阻率和相位可能会发生畸变,在数据反演解释之前需先进行预处理,包括近参考、静态校正、畸变处理等技术。

3.2 反射地震

哈拉湖坳陷浅表层高原植被覆盖,选择在冬季地表封冻时施工,减少季节性冻融层对地震波衰减作用,可有效改善激发和接收条件。为更好地获得高信噪比资料,采用排列中间激发的观测系统,采样间隔0.5 ms,记录长度3 s,激发震源使用KZ28AS大型可控震源激发,采用了小间距(道间距2 m,偏移距1 m,炮间距8 m),高覆盖次数采集方式(1200道接收,覆盖次数150次)。

表层高速冻土层引起谐振干扰波,地震记录上有有声波、面波和震源干扰波,去噪处理采用了低频阵列滤波、倾角滤波技术和二维F-K滤波等技术,各种干扰得到了有效压制。同时,为使坳陷倾斜界面产生的反射波更好地同相叠加,使反射波连续性更好,进行了倾角时差校正DMO处理。针对高原冻土区的地震信号特点,采用有效信号处理技术,组合各类处理方法提高了信噪比,保留了有效反射波。

3.3 地球化学

哈拉湖坳陷地球化学调查采用了大面积、多指标的调查方式,面积达3000 km²,采样密度1点/2 km²,样品总数1500件,分析指标包括顶空气、甲烷碳同位素、土壤酸解烃和荧光光谱等分析。

顶空气轻烃测试利用气相色谱仪分析样品放置气液两相平衡后的气体中轻烃组分含量,甲烷碳

同位素测试将制备好的烃类,转化为二氧化碳和水,利用质谱法测定二氧化碳中碳同位素组成。土壤酸解烃测试将试样在真空、恒温条件下经酸分解,进行色谱测定C₁-C₅烃类组分。荧光光谱测试将样品用试剂萃取后,利用荧光分光光度计检测其芳烃及其衍生物荧光光谱特征。以上4种有效指标组合分析烃类化学异常特征,阐述哈拉湖坳陷的天然气水合物信息。

4 地质构造特征

4.1 坳陷各区构造特征

哈拉湖西部的电性结构和地震反射特征较为一致,反映了该区以南北向分带特征,如图4、图5所示。地震反射剖面中不同地层对应的地震层位有不同的反射波形特征,新生界底界为强振幅特征,横向连续性好。三叠系与二叠系之间无明显的波阻抗界面,三叠系底界表现为弱振幅、连续性差特征,二叠系底界为强振幅,横向连续性好。盆地基底反射波波形杂乱,无明显反射规律。哈拉湖西部的电性特征以横向电性分块、纵向分层为主,露头小四极法测定结果表明主要岩性为砂岩、灰岩等的三叠纪、二叠纪地层电阻率值相对较高,二叠纪地层的电阻率值比三叠纪地层稍低,而新生代地层一般为松散地层,总体表现为低阻。从图5可知,大范围高阻体主要分布在剖面南部和北部,低阻异常分布于中南部。剖面北部电性特征表现为电阻率等值线扭曲和局部存在低阻异常,推测为结晶基底隆起、地层变形强烈和断裂发育。测线南部的高阻体

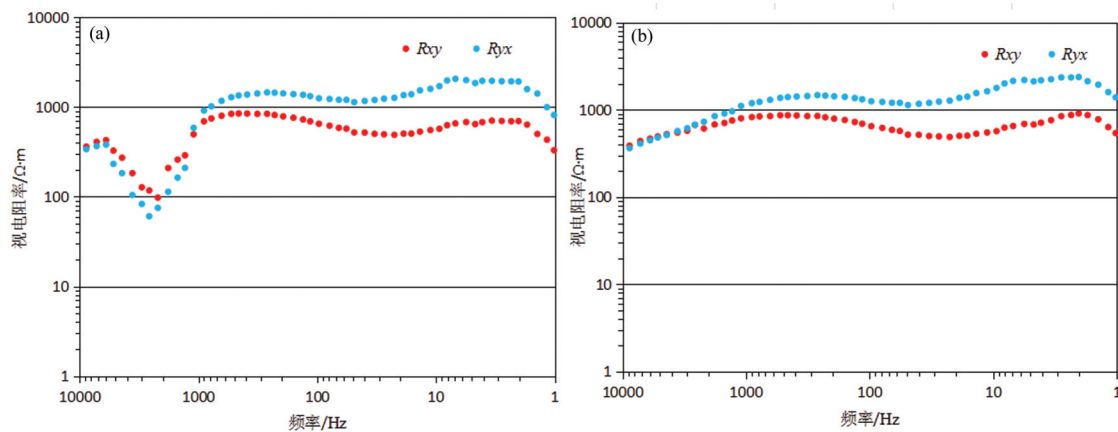


图3 时间(a: 10~11 h; b: 14~15 h)–视电阻率曲线对比图

Fig.3 Time (a: 10–11 h; b: 14–15 h) – resistivity curve comparison diagram

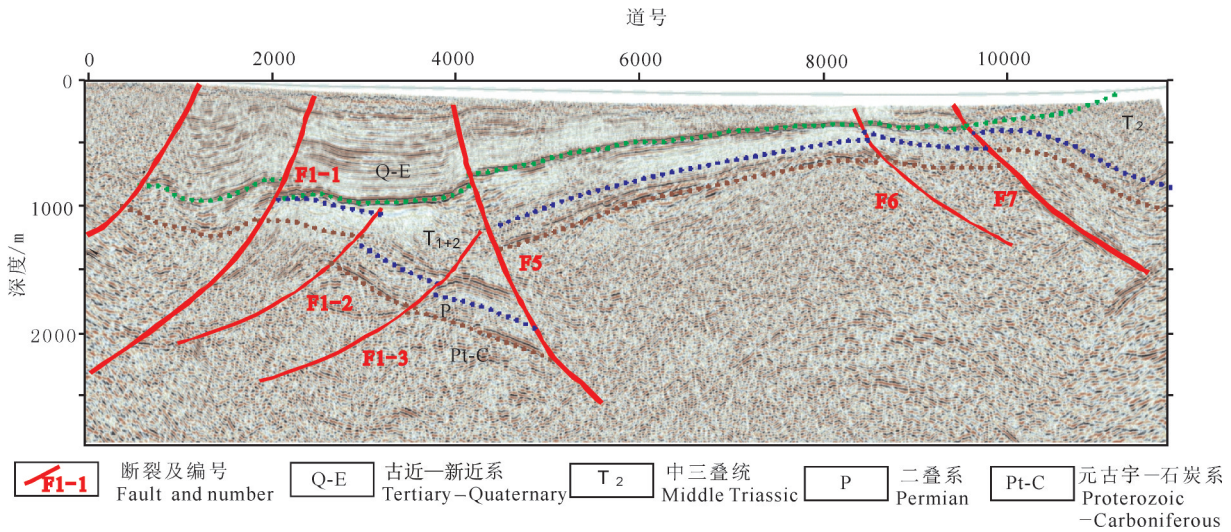


图4 哈拉湖西部地震DZ1测线反射剖面解释图(张宝强, 2017)

Fig.4 Interpretation of the reflection profile of the seismic DZ1 line in western Hala Lake (after Zhang Baoqiang, 2017)

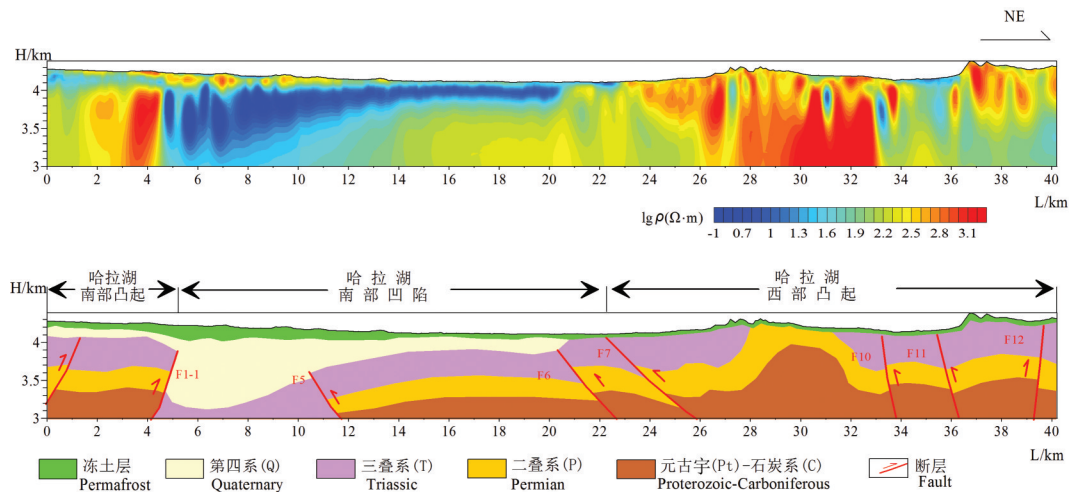


图5 哈拉湖西部N14+L01线电阻率剖面和综合解释图

Fig.5 The resistivity profile and comprehensive interpretation of N14+L01 line in western Hala Lake

结构较陡,推测发育高倾角向北逆冲断裂(F1)。剖面中南部分布大范围的低阻异常,在剖面5~8 km范围最深,表现出新生代沉积地层大面积分布,坳陷中心靠近南部。结合哈拉湖西部的电性结构和地震反射特征,反映了哈拉湖西部地质构造主要以“两隆一凹”为主,新生界沉积地层分布于剖面中南部,剖面南部和北部为隆起区和发育对冲型逆冲断裂(F1、F6、F7)。

哈拉湖东部高阻体以长轴状分布,电性界面连续性,剖面北部和南部浅部0~1 km深度以低阻异常分布为主,如图6所示。中间凸起的长轴状高阻

结构,反映了剖面中部地层隆起,发育宽缓背斜构造,剖面以“两凹一隆”构造特征,剖面南部和北部的低阻异常范围,反映了第四系沉积凹陷范围,北部凹陷最深,第四系沉积地层厚度超过1 km。剖面北端推测存在深大断裂带,即疏勒南山南缘断裂带,断裂深度可能超过1 km。哈拉湖东部高阻体范围逐渐变大,反映了古生代—中生代地层逐渐抬升。

哈拉湖南部的地震反射剖面中,以构造样式和地震波场特征可反映出3套构造层,如图7所示。第四系底界强反射,频率低。以二叠纪、三叠纪地层为中构造层,以短轴状的反射波组形态反映了向

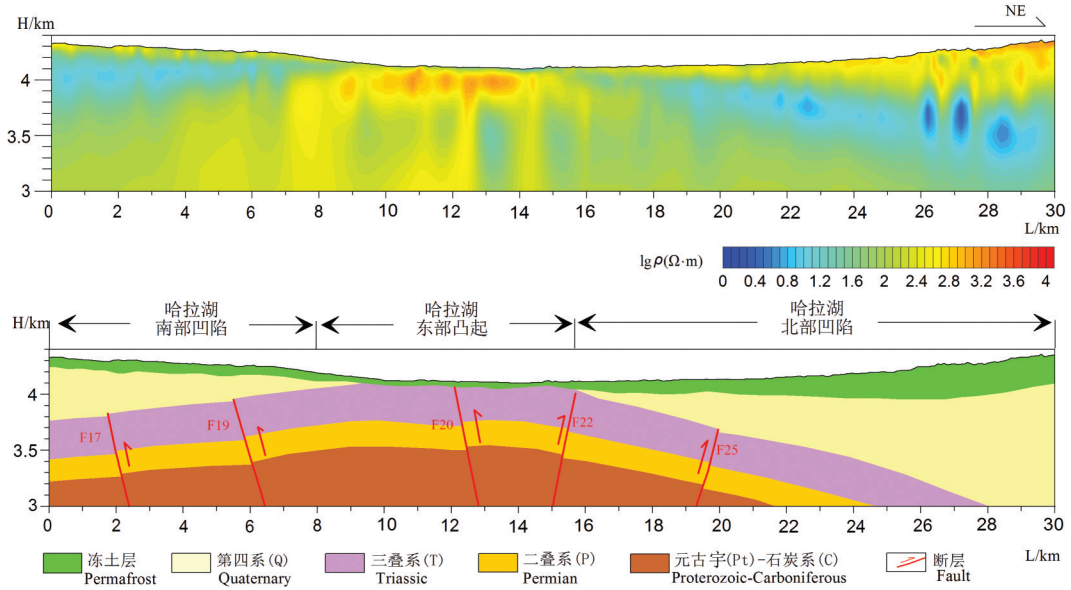


图6 哈拉湖东部L16线电阻率剖面 and 综合解释图

Fig.6 The resistivity profile and comprehensive interpretation of L16 line in eastern Hala

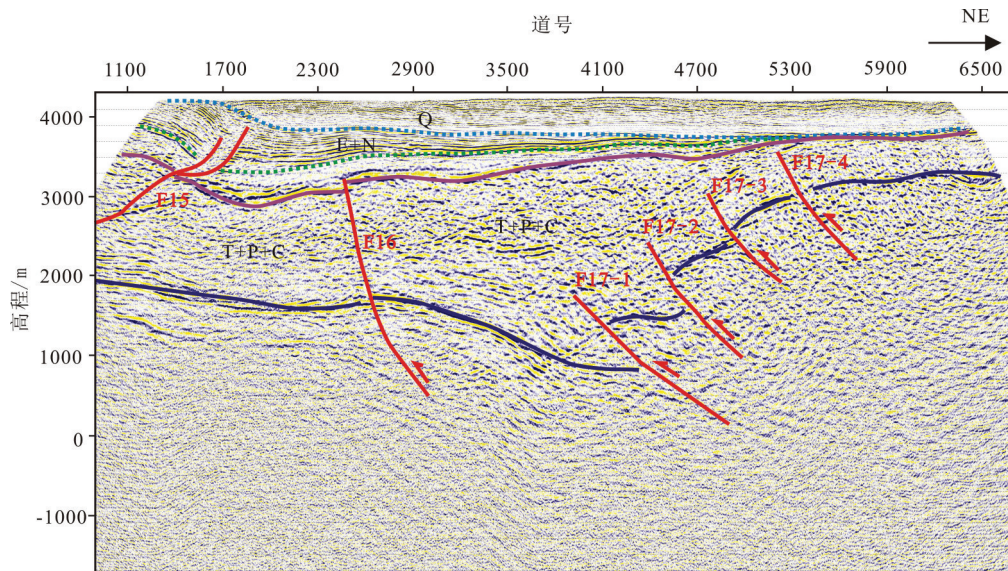


图7 哈拉湖东南部地震DZ2测线反射剖面解释图

Fig.7 Interpretation of the reflection profile of the seismic DZ2 line in the south of Hala Lake

斜构造。以盆地结晶基底的下构造层,地震反射界面消失,呈反射空白、弱振幅和相位杂乱特征。依据反射波特征可推测发育台阶状的向南逆冲断裂F16、F17和向北逆冲断裂F1。

从图8的电性结构可知,哈拉湖南部以高一低一中高阻纵向分层结构,冻土层在表现为浅部厚100 m高电阻层,冻土层以下1000 m内主要为第四系沉积层,二叠纪—三叠纪地层发育宽缓向斜构

造,与地震反射特征一致。哈拉湖北部和南部的电阻率剖面都有相似的电性结构,反映了凹陷构造在平面上以东西条带状展布。

4.2 坳陷整体构造特征

哈拉湖地区受多期构造运动影响,晚二叠世末期—晚三叠世末受海西运动和印支运动影响,逐渐抬升为陆地剥蚀区(宋博文等,2014)。晚新生代以来,受青藏高原的隆升和向NE方向的持续挤压扩

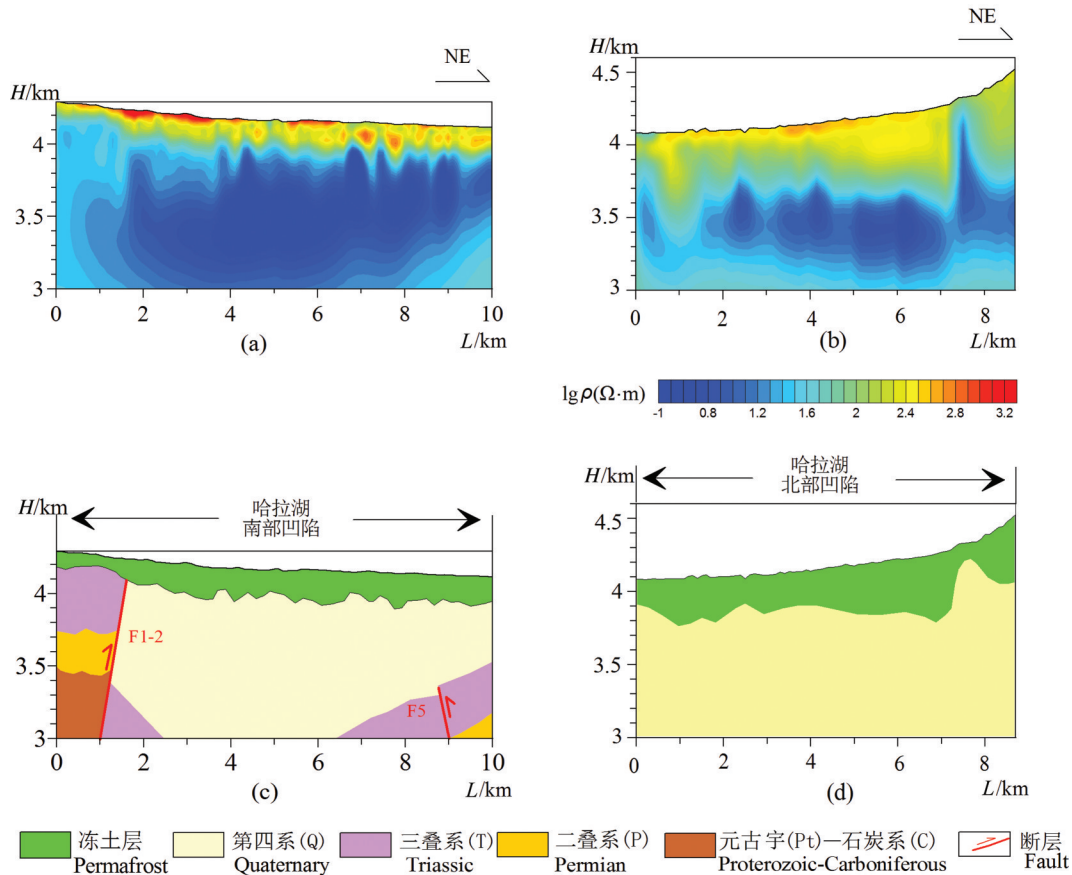


图8 哈拉湖南部N19线(a、c)和北部L13线(b、d)电阻率剖面 and 综合解释图

Fig.8 The resistivity profile and comprehensive interpretation of southern N19 line (a, c) and northern L13 line (b, d) in Hala Lake

展作用,在祁连山地区产生了强烈的挤压逆冲和地壳缩短等构造变形(许志琴等,2004),形成目前构造及地层展布主要为NW-SE走向的构造格局。

哈拉湖区内1:25万布格重力异常为明显的近等轴状重力低异常,重力等值线呈北西向展布梯级带,与已知的构造断裂带方向一致,规模较大的重力低值区反映了坳陷盆地的特征(屈念念,2018)。从电性结构和地震反射特征反映出了坳陷的地质构造特征,调查区以南北向分带、东西向分区块特征为主,与南祁连盆地整体构造特征一致,如图9所示。从哈拉湖坳陷的海拔3500 m电阻率等值线平面图显示,调查区主要分2个高电阻异常区,3个低电阻异常区。由于古近-新近系或第四系沉积地层未胶结成岩,地层孔隙度大、含水率高,物性的电性测量为低电阻,值域范围1~100 Ω·m。在电阻率等值线平面图上,在一定深度及平面范围内,低阻异常区代表了盆地、古近-新近系沉积凹陷区。高阻结构对应了地层凸起区,除断裂破碎带外,地层

完整性好,孔隙度低、含水率低,物性的电性测量为高电阻率。结合电性结构和地震反射特征,调查区可划分出4个凹陷区(哈拉湖中部、北部、南部和西北部凹陷)和2个凸起区(哈拉湖东西两区),其中哈拉湖北部凹陷发育最大,其次为哈拉湖南部凹陷,受断裂控制整体为NW-SE走向。

结合剖面电性特征和地质资料,划分了哈拉湖坳陷断裂F1~F26,断裂主要为NW-SE走向,与南祁连整体构造走向一致。其中,哈拉湖南北两侧的断裂最为发育,分别为拜兴哈达隆向北逆冲断裂F1和疏勒南山南缘左旋走滑断裂,哈拉湖坳陷地层及构造受南北两侧断裂控制,尤其是疏勒南山南缘的深大断裂构造。除了以NW-SE走向的断裂,哈拉湖东部凸起区还发育NE-SW走向的断裂,说明中祁连南缘断裂走滑过程中造成了构造应力差异。未发现有南北走向的断裂和前人认为的伊和苏力-哈拉湖一线隐伏断裂,哈拉湖东西部凸起可推断被NE-SW走向的隐伏断裂分开,说明NE-SW走

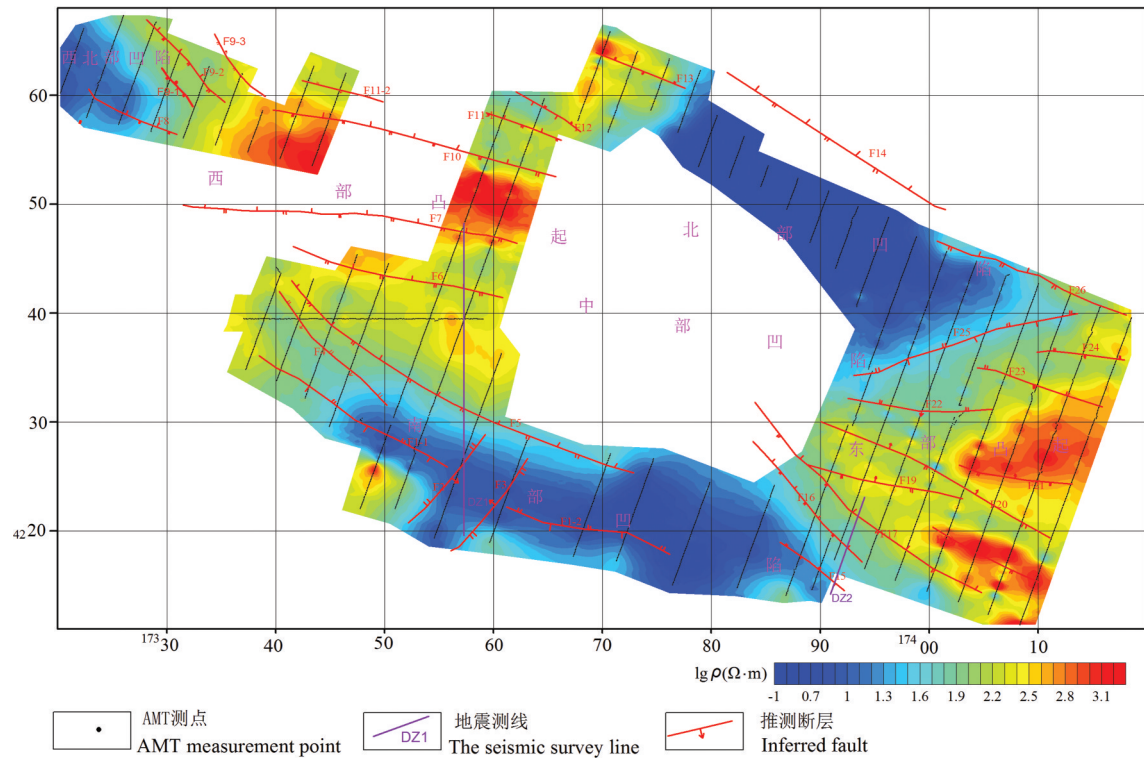


图9 哈拉湖地区高程3500 m电阻率平面等值线与综合解释图

Fig.9 The contour and comprehensive interpretation of the resistivity level of 3500m in the Hala Lake area

向的断裂对哈拉湖坳陷有一定的控制作用,特别是对哈拉湖东部凸起区。哈拉湖南部凹陷处发育多条逆冲断裂F4、F5等,地层倾向和断裂断距不同,说明该区构造先拉张后挤压,燕山期的伸展作用使得该处处于局部拉张。

5 冻土分布特征

冻土层因地层中含冰成分多,含水率低,造成电阻率高。冻土层在电阻率剖面中表现为地表稳定连续或断续层状分布的高阻层,高阻层底界对应了冻土层厚度。

从冻土层厚度分布平面图(图10)可知,哈拉湖坳陷新生界沉积区以大面积片状和基岩出露区以岛状分布为主。冻土层发育区主要分布在哈拉湖南部和北部,以大面积片状均匀分布。哈拉湖北部冻土层发育最大厚度约280 m,高程越大越发育,说明与高程关系密切。哈拉湖南部冻土层发育均匀,厚度为90~190 m。冻土对气候变化响应的时间及其影响深度主要取决于升温范围、持续时间、幅度和速率,并与岩性、地表覆被、地下冰、地下水、地热背景、地温等紧密相关(程国栋,2013)。哈拉湖地

貌以周边四面环山,测区以冲洪积平原带为主,地势平坦,地表水和地层含冰量高,地表被巨厚的第四系覆盖,沼泽草甸发育发育,说明地表覆被、地下冰和高海拔是哈拉湖坳陷稳定多年冻土层发育的主要因素。

哈拉湖东部和西部冻土层分布特征主要以岛状分布,冻土层厚度为10~90 m。基岩出露区地形变化大,高差100~200 m,地形地貌复杂造成了各处坡向、海拔高度、地表覆盖、表层土壤水分不同等因素制约了冻土形成和分布。此外,出露区不同地层岩性的孔隙度、含冰量及地温梯度不同等也影响了冻土的形成,说明了基岩出露区影响冻土层发育的复杂因素多。

6 地球化学特征

哈拉湖坳陷的地球化学异常特征可能指示了水合物矿藏,依据地球化学样品分析结果特征,圈出了2处地球化学异常区I号和II号(图11)。I号异常区分布在哈拉湖西部,异常指标组合为酸解重烃(图11)、酸解烃干燥系数(图12)、顶空气甲烷(图13)和荧光光谱(图14),地球化学异常存在空间分

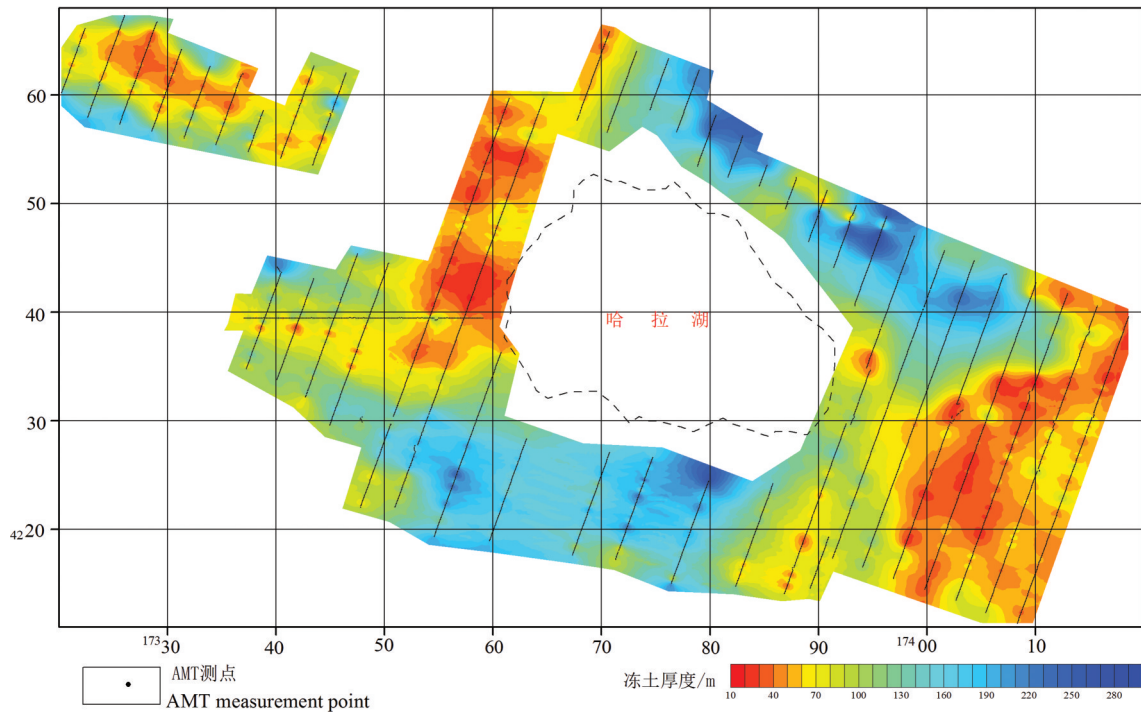


图 10 哈拉湖地区冻土层厚度平面分布图

Fig.10 Distribution of the thickness of permafrost in the Hala Lake area

带特征,中心以酸解烃重烃、干燥系数异常,向东为顶空气甲烷。顶空气甲烷及干燥系数异常呈团块状,荧光光谱异常展布方向为NNE向,异常浓集中心明显,强度较高,异常分布具有分带特征。酸解烃和顶空气主要分别为化学和物理吸附烃,而荧光光谱是液态芳烃,可推断此异常主要由深部沿断裂通道运移的烃类物质所引起。

II号异常主要是酸解烃异常,无顶空气和荧光异常,与地球化学异常I号区类型不同,异常呈NWW向展布,异常浓积程度高。异常区地表出露二叠系勒门沟—草地沟并组(P1-c),岩性主要为酸解烃含量较高的碎屑岩、生物灰岩及页岩。II号异常主要是酸解烃异常,无顶空气和荧光异常,因此推断异常主要为地层岩性所引起的异常。

7 天然气水合物成藏条件讨论

陆域天然气水合物成藏条件主要包括气源条件、储存条件、封盖条件和温压条件等,相比木里坳陷天然气水合物烃源岩主要以侏罗系江仓组、木里组及三叠系尕勒得寺组,哈拉湖坳陷缺失侏罗系地层沉积,可能缺少水合物形成中主要烃类气源的侏

罗系烃源岩层。另外,木里坳陷侏罗统生烃高峰期在早白垩世末期,哈拉湖坳陷上三叠统尕勒得寺组暗色泥岩的生烃高峰期应早于早白垩世,该时期的哈拉湖地区处于隆升剥蚀阶段,埋藏较浅的上三叠统含油气系统容易遭受破坏,因此,哈拉湖地区烃源岩条件相对差。但祁连山地区构造沉积演化也使得烃源岩层具有一定的生烃潜力,哈拉湖坳陷的主要烃源岩为下二叠统草地沟组及上三叠统尕勒得寺组暗色泥岩,其中上尕勒得寺组为一套湖沼相沉积,沉积厚度较大,岩性分布稳定,其有机质类型为II₂型(腐泥腐殖型),处于高成熟—过成熟演化阶段(孙忠军等,2013;卢振权等,2015)。

哈拉湖坳陷基岩出露区和新生界沉积区的具有不同水合物成藏环境,可能会造成水合物储存条件差异。基岩出露区长期处于剥蚀,地层断裂发育,且断裂倾角较大,冻土层发育差,对于烃类气体保存不利,难以形成水合物。凹陷区新生界冻土层发育,盖层条件良好,但新生代地层孔隙度大,地下水扰动等会破坏烃类气体的保存条件,造成烃类气体逃逸。凹陷区断裂不发育,断裂通道难以到达水合物稳定层,缺乏烃类气体的运移通道和新生代

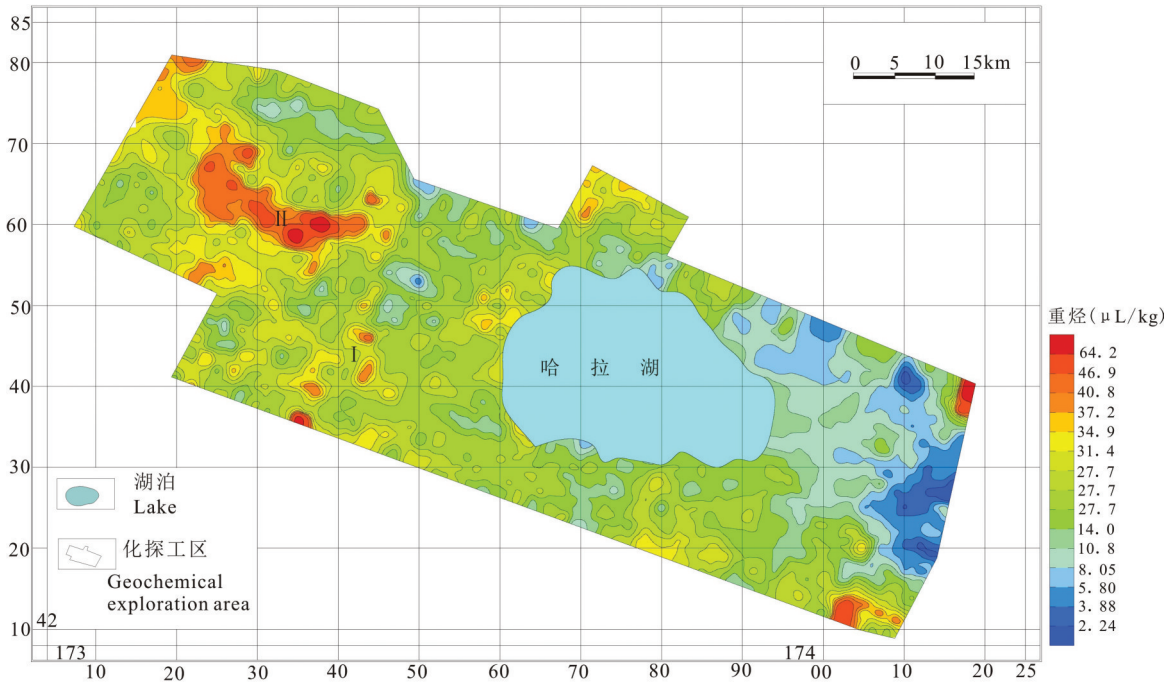


图11 哈拉湖坳陷土壤酸解烃重烃(C2+)地球化学图
 Fig.11 Geochemical map of soil acid hydrolysis (C2+) in the Hala Lake area

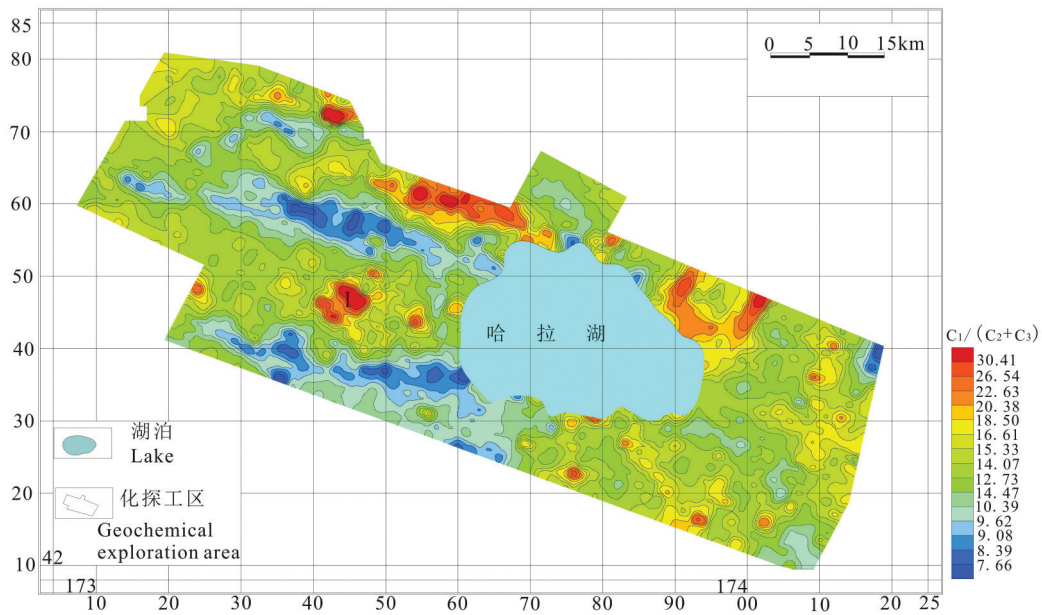


图12 哈拉湖坳陷土壤酸解烃干燥系数地球化学图
 Fig.12 Geochemical map of soil drying coefficient in the Hala lake area

地层含水率小,造成新生界沉积区水合物形成条件差。南祁连盆地哈拉湖坳陷天然气水合物科学钻探试验QH-1孔、QH-2孔,未能钻获到天然气水合物(范东稳等,2019),也可能说明了调查区上三叠

统含油气系统难以保存,巨厚的新生代地层中难于形成天然气水合物储层。木里地区的天然气水合物成藏受断层构造控制,多数在砂岩孔隙储层、泥岩与油页岩裂隙储层中,分布在断裂F1和F2附近,

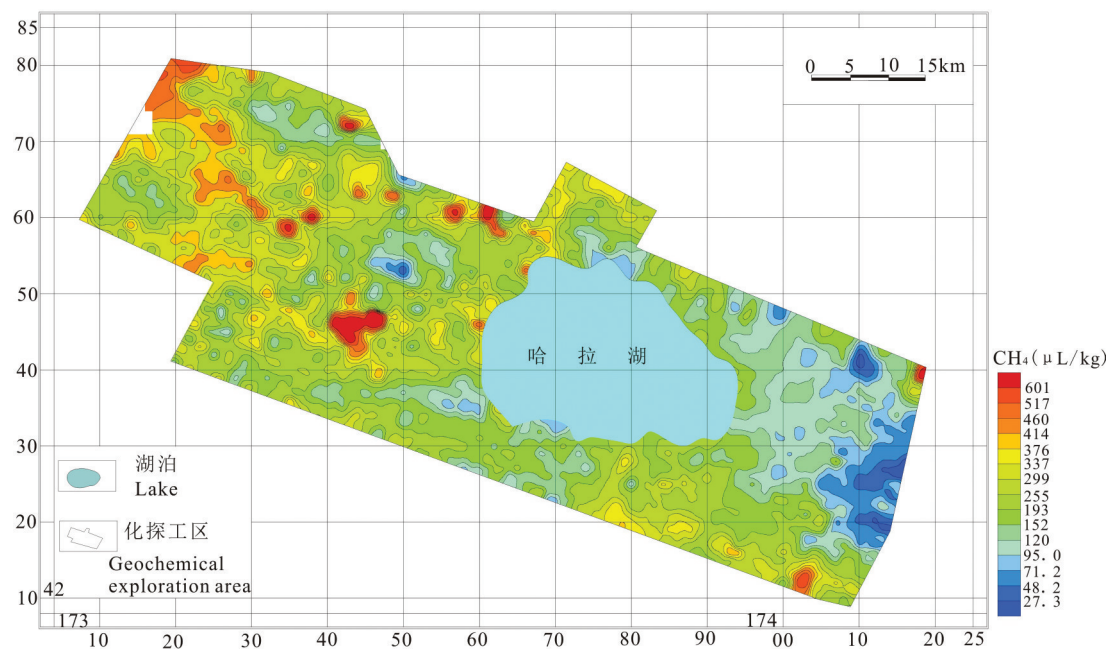


图13 哈拉湖坳陷顶空气甲烷地球化学图

Fig.13 Geochemical map of top air methane in the Hala Lake area

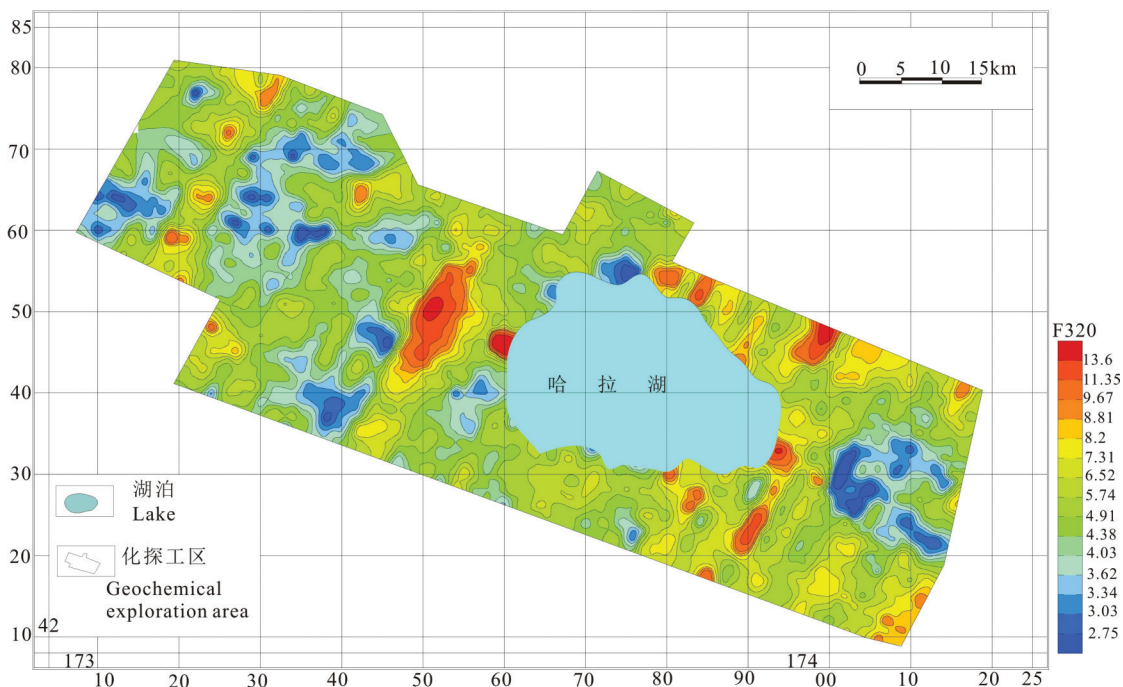


图14 哈拉湖坳陷荧光F320地球化学图

Fig.14 Geochemical map of fluorescence F320 in the Hala Lake area

断裂构造为烃类物质提供了运移通道和储存空间。另外,处于挤压性质的逆冲断裂和断裂上部的泥岩层给水合物提供了重要的封堵作用。因此,在

哈拉湖坳陷或者青藏高原其他区域,在逆冲断裂附近对于天然气水合物储存条件可能最有利。

祁连山地区以上三叠统尕勒得寺组暗色泥岩

为生油层(符俊辉等,2000;谢其锋等,2011),本组的砂岩为储集层及泥岩或冻土层为盖层,印支—燕山期构造作为圈闭可组成自生自储式油气藏系统(符俊辉等,2000;戴金星等,2017)。哈拉湖地区与木里地区海拔高度相当,冻土封盖条件和温压条件相近,但是冻土层的形成时间和导气断裂的形成时间耦合性差,可能会不利于深层气体的保存。

以上综合分析认为,调查区的天然气水合物气源条件稍差,冻土封盖条件良好,烃源岩的保存完整性和印支—燕山期构造形成的圈闭构造可作为调查区水合物成藏远景区的重要因素。对比木里地区的水合物主要分布于燕山期F1和F2逆冲断裂附近,水合物成藏条件较好,基岩出露区和新生界沉积区水合物保存条件不利,哈拉湖坳陷应重点关注印支—燕山期构造形成的圈闭构造,尤其是坳陷的逆冲断裂带附近。在哈拉湖西部化探I号异常区及坳陷北部构造较发育,断裂构造为深部烃类气源提供了通道条件,冻土层发育良好,保存条件较好,地球化学烃类异常也较明显。哈拉湖北部发育深大断裂,有利于深层的三叠系烃源岩发育,中三叠统碳酸盐岩储层相对较好(赵军辉,2012),哈拉湖坳陷北部为较好的含气区(屈念念,2018)。综合考虑水合物成藏条件,哈拉湖地球化学I号异常区及坳陷北部可作为天然气水合物成藏远景区。

8 结 论

(1)哈拉湖东部呈“两凹一隆”构造特征,往东地层逐渐抬升,褶皱构造发育。哈拉湖西部呈“两隆一凹”构造特征,南侧发育向北逆冲断裂,北侧地层隆起,变形强烈,发育向南逆冲断裂。测区可划分4个凹陷区和2个凸起区,以NW-SE条带状分布,凹陷区内新生界沉积地层发育,局部沉积厚度大于1000 m。

(2)结合哈拉湖坳陷电性结构和地震反射特征,划分出了26条断裂构造,以NW-SE走向为主。哈拉湖东西两区的构造差异推断由NE走向断裂,造成哈拉湖东西构造差异。

(3)哈拉湖坳陷的烃源岩条件相对差,烃源岩的保存完整性和印支—燕山期圈闭构造是哈拉湖坳陷能否成为水合物成藏远景区的关键,哈拉湖地球化学I号异常区及坳陷北部水合物成藏条件相

对较好,可作为天然气水合物成藏远景区。

References

- Collett, Dallimore. 2000. Permafrost-related natural gas hydrate[C]// Max M D. Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments. The Nether Lands: Kluwer Academic Publishers, 43-60.
- Chen Duofu, Wang Maochun, Xia Bin. 2005. Formation condition and distribution prediction of gas hydrate in Qinghai-Tibet Plateau permafrost[J]. Chinese Journal of Geophysics, 48(1):165-172(in Chinese with English abstract).
- Cao Jie, Zhang Jiawu, Zhang Chengjun, Chen Fahu. 2007. Environmental changes during the past 800 years recorded in lake sediments from Hala lake on the northern Tibetan plateau[J]. Quaternary Sciences, 27(1):100-107(in Chinese with English abstract).
- Cheng Guodong, Jin Huiju. 2013. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 40(1):1-11(in Chinese with English abstract).
- Dallimore, Collett, Wang Wanchun. 1998. Intrapermafrost gas hydrates from a deep core hole in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada[J]. Natural Gas Geoscience, (Z1):32-36.
- Dallimore, Collett. 1999. Regional gas hydrate occurrences, permafrost conditions, and Cenozoic geology, Mackenzie Delta area [C]//Dallimore, Uchida T, Collett. Scientific results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Ottawa, Ontario: Geological Survey of Canada, 544:31-43.
- Dai Jinxing, Ni Yunyan, Huang Shipeng, Peng Weilong, Han Wenxue, Gong Deyu, Wei Wei. 2017. Genetic types of gas hydrates in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 44(6): 837-848(in Chinese with English abstract).
- Fan Dongwen, Lu Zhenquan, Liu Hui, Xiao Rui, Wang Weichao, Li Yonghong, Tang Shiqi. 2019. Gas composition and geological significance of headspace gases from the gas hydrate scientific drilling holes in Harhu Depression, southern Qilian Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 30(4):526-538(in Chinese with English abstract).
- Fang Hui, Sun Zhongjun, Xu Mingcai, Lin Zhenzhou. 2017. Main achievements of gas hydrate exploration technology in permafrost regions of China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 41(6):991-997(in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin. 1997. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China history, presence and prospect[J]. Advance in Earth Sciences, (4):5-12(in Chinese with English abstract).
- Fu Junhui, Zhou Lifa. 2000. Triassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features[J]. Northwest Geoscience, (2):64-72(in Chinese with English abstract).

- He Jian, Liang Qianrong, Ma Yun, Shi Yaohong, Xiao Zhen. 2018. Geohazards types and their distribution characteristics in the natural gas hydrate area on the northern slope of the South China Sea[J]. *Geology in China*, 45(1):15–28(in Chinese with English abstract).
- Liu Huaishan, Han Xiaoli. 2004. Geophysical recognition and prediction of natural gas hydrates in Qiangtang basin of Tibet[J]. *North Western Geology*, 37(4): 33–38(in Chinese with English abstract).
- Lu Zhenquan, Sultan Nabil, Jin Chunshuang, Rao Zhu, Luo Xurong, Wu Bihao, Zhu Youhai. 2009. Modeling on gas hydrate formation conditions in the Qinghai–Tibet plateau permafrost[J]. *Chinese J. Geophys.*, 52(1):157–168(in Chinese with English abstract).
- Lu Zhenquan, Li Yonghong, Wang Weihao, Liu Changling, Wen Huaijun. 2015. Study on the accumulation pattern for permafrost-associated gas hydrate in Sanlutian of Muli, Qinghai[J]. *Geoscience*, 29(5):1014–1023(in Chinese with English abstract).
- Qu Niannian, Zhang Minghua, Huang Jinming, Yu Hailong. 2018. Gravity anomaly features analysis and its geological significance in Southern Qilian Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 33(3): 1123–1131(in Chinese with English abstract).
- Sloan, Koh. 2007. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 1–3.
- Sun Zhongjun, Yang Zhibing, Qing Aihua, Zhou Yalong, Zhang Fugui, Yang Zhibin. 2013. Geochemical exploration model of gas hydrate in permafrost region, Qilian Mountain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(z1):230–231(in Chinese with English abstract).
- Song Bowen, Xu Yadong, Liang Yiping, Jiang Shangsong, Luo Mansheng, Ji Junliang, Han Fang, Wei Yi, Xu Zenglian, Jiang Gaolei. 2014. Evolution of Cenozoic sedimentary basins in western China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(8):1035–1051(in Chinese with English abstract).
- Su Pibo, Liang Jinqiang, Fu Shaoying, Lü Wanjuan, Gong Yuehua. 2017. Geological background and accumulation models of gas hydrate reservoir in northern South China Sea[J]. *Geology in China*, 44(3): 415–427(in Chinese with English abstract).
- Wu Qingbai, Cheng Guodong. 2008. Research summarization on natural gas hydrate in permafrost regions[J]. *Advance in Earth Sciences*, 23(2):111–119(in Chinese with English abstract).
- Wang Pingkang, Zhu Youhai, Zhang Xuhui, Zhang Shuai, Pang Shouji, Xiao Rui, Li Bing. 2015. Permafrost structures and their effects on the accumulation of the natural gas hydrates in the Qiangtang Basin, northern Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(1):57–67(in Chinese with English abstract).
- Wang Pingkang, Zhu Youhai, Zhang Suai, Fu Xiugen, Wu Jixiu, Li Kuan, Wang Dayong, Yao Dawei, Xiao Rui, Zhang Xuhui, Luo Dashuang, Fan Ruibao, Li Guojiang. 2017. An analysis of gas hydrate accumulation condition in the Duck Lake area, Qiangtang Basin, northern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(4): 601–615(in Chinese with English abstract).
- Wang Lifeng, Fu Shaoying, Liang Jinqiang, Shang Jiuqing, Wang Jingli. 2017. A review on gas hydrate developments propped by worldwide national projects[J]. *Geology in China*, 44(3):439–448 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Dingpu. 1982. The characteristics of geological structures in the Qilianshan region, China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (4):364–370(in Chinese with English abstract).
- Xu Xuezu, Cheng Guodong, Yu Qihao. 1999. Research prospect and suggestions of gas hydrates in permafrost regions on the Qinghai–Tibet plateau[J]. *Advance in Earth Sciences*, 14(2):201–204(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Zeng Lingsen, Yang Jingsui, Li Haibing, Jiang Mei, Jing Zhijun, Zhen Herong, Guo Qijun. 2004. Role of large-scale strike-slip faults in the formation of petroleum bearing compressional basin–mountain range systems[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, (6):631–643(in Chinese with English abstract).
- Xie Qifeng, Zhou Lifa, Ma Guofu, Tan Xiuzhong, Wan Yanzhou, Liang Shiwei, Zhang Kai, Zhao Junhui. 2011. Organic geochemistry of Triassic source rocks in the southern Qilian basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 47(6):1034–1040(in Chinese with English abstract).
- Xu Xing, Luo Xianhu, Peng Deng, Chen Aihua. 2017. First successful trial collection of natural gas hydrate in China[J]. *Geology in China*, 44(3):620–621(in Chinese with English abstract).
- Yang Lirong, Li Jianxing, Yue Leping, Wang Hongliang, Guo Huaijun, Zhu Xiaohui, Zhu Tao, Du Kai, Zhang Rui, Zhang Yunxiang, Gong Hujun. 2017. Paleogene–Neogene stratigraphic realm and tectonic–sedimentary evolution of the Qilian Mountains and their surrounding areas[J]. *Science China Earth Sciences*, 47(5): 586–600(in Chinese).
- Zhu Youhai, Liu Yaling, Zhang Yonqing. 2006. Formation conditions of gas hydrates in permafrost of the Qilian mountain, northwest China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(1/2):58–63(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongtao, Zhang Haiqi, Zhu Youhai. 2007. Gas hydrate investigation and research in China: Present status and progress[J]. *Geology in China*, 35(6):953–961(in Chinese with English abstract).
- Zhu Youhai, Zhang Yonqin, Wen Huaijun, Lu Zhenquan, Jia Zhiyao, Li Yonghong, Li Qinghai, Liu Changling, Wang Pingkang, Guo Xingwang. 2009. Gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11):1762–1771(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junhui, Zhou Lifa. 2012. Characteristics and evaluation of carbonate reservoir in the southern Qilian Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 24(2):31–36.
- Zhu Xiaoli, Wu Leizhang, Zhao Junhui. 2013. Evaluation of

- Hydrocarbon source rock of the Middle Triassic Dajialian Formation of Halahu Depression in south Qilian basin[J]. Ground Water, 35(1):119-121(in Chinese with English abstract).
- Zhang Baoqiang. 2017. Study on the Prospect of Deep Structure and Natural Gas Hydrate in Qinghai Hala Lake Area[D]. Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Liang Jinqiang, Su Pibo, Wei Jiangong, Sha Zhibin, Lin Lin, Liang Jin, Huang Wei. 2018. Migrating pathways of hydrocarbons and their controlling effects associated with high saturation gas hydrate in Shenhu area, northern South China Sea[J]. Geology in China, 45(1):1-14(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈多福, 王茂春, 夏斌. 2005. 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, 48(1):165-172.
- 曹洁, 张家武, 张成君, 陈发虎. 2007. 青藏高原北缘哈拉湖近 800 年来湖泊沉积及其环境意义[J]. 第四纪研究, 27(1):100-107.
- 程国栋, 金会军. 2013. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. 水文地质工程地质, 40(1):1-11.
- Dallimore, Collett, 王万春. 1998. 加拿大马更些三角洲西北部永冻层的气水合物[J]. 天然气地球科学, (Z1):32-36.
- 戴金星, 倪悦燕, 黄士鹏, 彭威龙, 韩文学, 龚德瑜, 魏伟. 2017. 中国天然气水合物气的成因类型[J]. 石油勘探与开发, 44(6):837-848.
- 冯益民. 1997. 祁连山带研究概况——历史、现状及展望[J]. 地球科学进展, (4):5-12.
- 符俊辉, 周立发. 2000. 南祁连盆地三叠纪地层及石油地质特征[J]. 西北地质科学, (2):64-72.
- 范东稳, 卢振权, 刘晖, 肖睿, 王伟超, 李永红, 唐世琪. 2019. 南祁连盆地哈拉湖坳陷天然气水合物科学钻孔岩心顶空气组成及其地质意义[J]. 天然气地球科学, 30(4):526-538.
- 方慧, 孙忠军, 徐明才, 林振洲. 2017. 冻土区天然气水合物勘查技术研究主要进展与成果[J]. 物探与化探, 41(6):991-997.
- 何健, 梁前勇, 马云, 石要红, 夏真. 2018. 南海北部陆坡天然气水合物区地质灾害类型及其分布特征[J]. 中国地质, 45(1):15-28.
- 刘怀山, 韩晓丽. 2004. 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, 37(4): 33-38.
- 卢振权, Sultan Nabil, 金春爽, 饶竹, 罗续荣, 吴必豪, 祝有海. 2009. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件模拟研究[J]. 地球物理学报, 52(1):157-168.
- 卢振权, 李永红, 王伟超, 刘昌岭, 怀军. 2015. 青海木里三露天冻土天然气水合物成藏模式研究[J]. 现代地质, 29(5):1014-1023.
- 屈念念, 张明华, 黄金明, 余海龙. 2018. 南祁连盆地重力异常特征及其地质意义[J]. 地球物理学进展, 33(3):1123-1131.
- 孙忠军, 杨志斌, 秦爱华, 周亚龙, 张富贵, 杨志斌. 2013. 祁连山冻土区天然气水合物地球化学勘查模型[J]. 地质学报, 87(z1):230-231.
- 宋博文, 徐亚东, 梁银平, 江尚松, 骆满生, 季军良, 韩芳, 韦一, 徐增连, 姜高磊. 2014. 中国西部新生代沉积盆地演化[J]. 地球科学, 39(8):1035-1051.
- 苏丕波, 梁金强, 付少英, 吕万军, 龚跃华. 2017. 南海北部天然气水合物成藏地质条件及成因模式探讨[J]. 中国地质, 44(3):415-427.
- 吴青柏, 程国栋. 2008. 多年冻土区天然气水合物研究综述[J]. 地球科学进展, 23(2):111-119.
- 王平康, 祝有海, 张旭辉, 张帅, 庞守吉, 肖睿, 李冰. 2015. 羌塘盆地冻土结构特征及其对天然气水合物成藏的影响[J]. 沉积与特提斯地质, 35(1):57-67.
- 王平康, 祝有海, 张帅, 付修根, 吴纪修, 李宽, 王大勇, 姚大为, 肖睿, 张旭辉, 罗大双, 范瑞宝, 李国江. 2017. 西藏羌塘盆地鸭湖地区天然气水合物成藏条件[J]. 地质通报, 36(4):601-615.
- 王力峰, 付少英, 梁金强, 尚久靖, 王静丽. 2017. 全球主要国家水合物探采计划与研究进展[J]. 中国地质, 44(3):439-448.
- 向鼎璞. 1982. 祁连山地质构造特征[J]. 地质科学, (4):364-370.
- 徐学祖, 程国栋, 俞祁浩. 1999. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议[J]. 地球科学进展, 14(2):201-204.
- 许志琴, 曾令森, 杨经绥, 李海兵, 姜枚, 金之钧, 郑和荣, 郭齐军. 2004. 走滑断裂、“挤压性盆-山构造”与油气资源关系的探讨[J]. 地球科学, (6):631-643.
- 谢其锋, 周立发, 马国福, 谭修中, 万延周, 梁士伟, 张凯, 赵俊辉. 2011. 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), 47(6): 1034-1040.
- 徐行, 罗贤虎, 彭登, 陈爱华. 2017. 中国首次试采天然气水合物成功[J]. 中国地质, 44(3):620-621.
- 杨利荣, 李建星, 岳乐平, 王洪亮, 郭怀军, 朱小辉, 朱涛, 杜凯, 张睿, 张云翔, 弓虎军. 2017. 祁连山及邻区古一新近纪地层分区与构造-沉积演化[J]. 中国科学:地球科学, 47(5):586-600.
- 祝有海, 刘亚玲, 张永勤. 2006. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J]. 地质通报, 25(1/2):58-63.
- 张洪涛, 张海启, 祝有海. 2007. 中国天然气水合物调查研究现状及其进展[J]. 中国地质, 35(6):953-961.
- 祝有海, 张永勤, 文怀军, 卢振权, 贾志耀, 李永红, 李清海, 刘昌岭, 王平康, 郭星旺. 2009. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. 地质学报, 83(11):1762-1771.
- 赵军辉, 周立发. 2012. 南祁连盆地碳酸盐岩储层特征与评价[J]. 岩性油气藏, 24(2):31-36.
- 朱晓莉, 吴磊章, 赵军辉. 2013. 南祁连盆地哈拉湖凹陷中三叠统大加连组烃源岩评价[J]. 地下水, 35(1):119-121.
- 张宝强. 2017. 青海哈拉湖地区深部构造与天然气水合物前景预测研究[D]. 昆明理工大学.
- 张伟, 梁金强, 苏丕波, 尉建功, 沙志彬, 林霖, 梁劲, 黄伟. 2018. 南海北部陆坡高饱和度天然气水合物气源运聚通道控藏作用[J]. 中国地质, 45(1):1-14.