

青海祁连山冻土区发现天然气水合物

祝有海¹⁾, 张永勤²⁾, 文怀军³⁾, 卢振权¹⁾, 贾志耀³⁾, 李永红³⁾,
李清海³⁾, 刘昌岭⁴⁾, 王平康¹⁾, 郭星旺¹⁾

- 1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037; 2) 中国地质科学院勘探技术研究所,
河北廊坊, 065000; 3) 青海煤炭地质 105 勘探队, 西宁, 810007;
4) 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛, 266071

内容提要:祁连山冻土区位于青藏高原北缘, 多年冻土面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$, 具有良好的天然气水合物形成条件和找矿前景。2008~2009 年间中国地质调查局在青海省天峻县木里煤田聚乎更矿区施工“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”, 迄今共完成钻探试验井 4 口, 总进尺 2059.13m, 分别在 DK-1、DK-2 和 DK-3 钻井中钻获天然气水合物实物样品, 取得了找矿工作的重大突破。天然气水合物产于冻土层之下, 埋深 133~396m。水合物呈白色、乳白色晶体, 点火能燃烧, 红外热像仪测温后呈明显的低温异常, 放进水里强烈冒泡, 水合物分解后能不断冒出气泡和水滴, 并残留下特征的蜂窝状构造。激光拉曼光谱仪检测呈现特征的水合物光谱曲线, 测井曲线也具有较明显的高电阻率和高波速标志。祁连山天然气水合物具有冻土层薄、埋深浅、气体组分复杂、以煤层气成因为主等明显特征, 是一种新类型水合物。这是我国冻土区首次钻获的天然气水合物实物样品, 也是全球首次在中低纬度高山冻土区发现天然气水合物实物样品, 具有重要的科学意义和经济意义。

关键词: 天然气水合物; 冻土; 祁连山

天然气水合物是由气体分子与水在低温高压条件下形成的白色结晶状物质, 主要产于海底沉积物和陆上永久冻土带中。这是一种新型的潜在能源, 全球资源量达 $2.1 \times 10^{15} \text{ m}^3$, 是煤炭、石油和天然气资源总量的两倍, 具有巨大的能源潜力 (Kvenvolden, 1988; Sloan, 1998; Makogon et al., 2007)。世界各国尤其是各发达国家和能源短缺国家均高度重视天然气水合物的调查研究, 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中 123 处, 陆地冻土区 9 处。冻土区水合物主要分布于俄罗斯、美国和加拿大等国的高纬度环北冰洋冻土区 (Collett, 1993; Collett et al., 2000; Dallimore et al., 1999, 2002), 中低纬度高山冻土区尚未发现过天然气水合物。我国也非常重视天然气水合物的调查研究, 已在南海和东海发现大量的异常标志, 并于 2007 年 5 月在南海北部神狐地区成功钻获水合物, 取得了找矿工作的重大突破。

我国是世界上第三冻土大国, 在青藏高原和大

兴安岭地区存在着大片冻土区, 多年冻土面积达 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土总面积的 22.4% (周幼吾等, 2000)。部分学者的研究成果显示, 青藏高原冻土区具备较好的天然气水合物形成条件, 并有可能形成天然气水合物 (徐学祖等, 1999; 张立新等, 2001; 黄朋等, 2002; 伊海生等, 2002; 刘怀山等, 2004; 陈多福等, 2005; 吴青柏等, 2006; 卢振权等, 2007; 库新勃等, 2007; 坚润堂等, 2009)。祝有海等 (2006) 依据祁连山木里地区的实测气体组分, 结合年平均地温、地温梯度和冻土层厚度等资料, 计算了祁连山冻土区天然气水合物形成的热力学条件, 结果表明祁连山木里地区也基本具备天然气水合物的形成条件。

2008~2009 年, 中国地质调查局组织中国地质科学院矿产资源研究所、勘探技术研究所和青海煤炭地质 105 勘探队等单位, 在祁连山木里地区开始施工“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”。2008 年 11 月 5 日在 DK-1 孔井深 133.5~135.5m 处首次发现天然气水合物实物样品, 之后分别在 11

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目“青藏高原冻土带天然气水合物调查评价”和国家重点基础研究发展计划项目 (编号 2009CB219501) 资助成果。

收稿日期: 2009-11-02; 改回日期: 2009-11-10; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 祝有海, 男, 1963 年生。研究员。主要从事天然气水合物和海洋地质研究。Email: zyh@mx.cei.gov.cn。

月 7 日和 11 月 10 日再次发现水合物。2009 年 5 月 31 日~10 月 11 日在 DK-2、DK-3 孔中再次钻遇天然气水合物,从而证实我国冻土区存在天然气水合物。这是我国冻土区首次发现天然气水合物,同时也是世界中低纬度高山冻土区首次发现天然气水合物,具有重要的科学意义和经济意义。

1 区域地质背景

祁连山冻土区地处青藏高原北缘,多年冻土面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ (周幼吾等,2000)。其大地构造单元一般划分为北祁连构造带(河西走廊、走廊南山)、中祁连陆块(托莱山)和南祁连构造带等三大构造单元。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(冯益民,1997)。

早古生代期间,祁连山地区为一介于柴达木地块和华北地块之间的小型洋盆,志留纪晚期的加里东运动使古洋盆封闭并开始隆升剥蚀。石炭纪时又开始下沉形成广阔的浅海陆棚相沉积,二叠纪时发

生南北差异升降,北祁连抬升成陆,而南祁连仍为浅海陆棚或陆表海环境。三叠纪时南祁连仍为海盆环境,沉积一套海相砂泥岩夹灰岩建造。晚三叠纪末的印支运动使得古特提斯海域封闭,整个祁连山地区抬升成陆,成为剥蚀区。之后的早燕山运动使得祁连山地区局部拉张,形成一系列条带状的山间断陷盆地,沉积一套侏罗系的河湖沼泽相含煤岩系(符俊辉等,1998)。白垩系和新近系以红色细粒碎屑岩、粘土岩为主,而第四系广布于盆地,以冰水—洪积和冰川相堆积物为主。

祁连山侏罗纪小型含煤盆地星罗棋布,组成祁连山含煤盆地群,其中疏勒河-大通河流域就分布有木里、瓦乌寺、雪霍立等 11 个含煤盆地(图 1)。这些含煤盆地都是北祁连深大断裂体系在燕山期再度复活形成的裂堑式断陷盆地,呈 NW—SE 向狭长带状断续分布。木里煤田是青海省最大的煤田,面积约 650 km^2 ,其主体包括西部的聚乎更矿区、弧山矿区、江仓矿区和东部的热水矿区以及外围的外力哈达矿区、海德尔矿区、默勒矿区等,是青海省最重要的煤炭基地。聚乎更矿区更因煤层厚、储量丰富和煤质好而受到广泛关注(文怀军等,2006)。

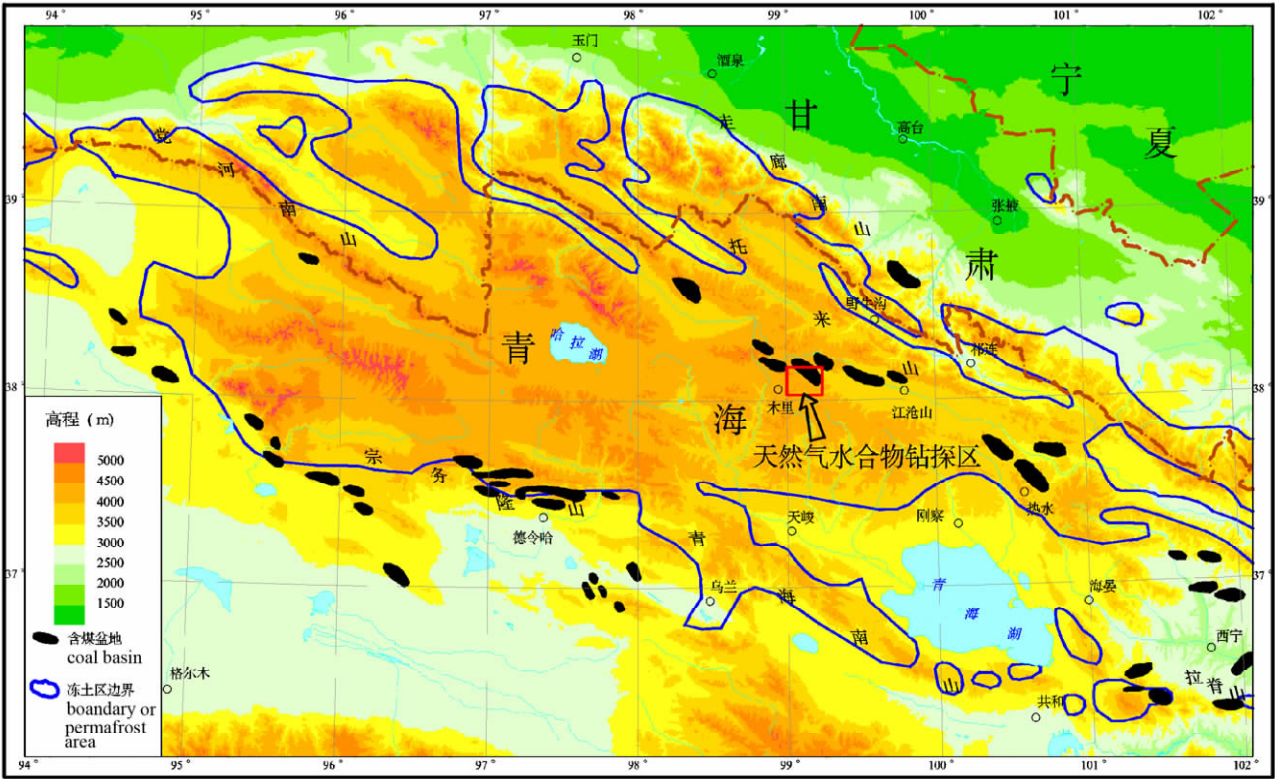


图 1 祁连山冻土区天然气水合物钻探试验区地理位置图

Fig. 1 The location map of the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost

“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”地处青海省天峻县木里镇境内,地质上位于木里煤田聚乎更矿区。聚乎更矿区呈 NWW—SEE 向展布,东西长约 19km,南北平均宽约 4km,面积约 76km²。聚乎更矿区总体上为一复式背斜构造,由一个大背斜和两个小向斜组成,其中北向斜分布有三井田、二井田和一无露天三个井田,南向斜由四井田、一井田、三露天和二露天组成。天然气水合物科学钻探试验区就位于南向斜的三露天井田内(图 2)。

木里煤田聚乎更矿区出露的地层主要包括第四系、上侏罗统、中侏罗统和上三叠统(图 3)。其基底为上三叠统,广泛出露于矿区南部及背斜轴部,岩性以黑色粉砂岩、泥岩及薄煤层为主,与上覆侏罗系呈平行不整合接触。中侏罗统包括木里组和江仓组,下部的木里组又可细分为上下两岩性段,下段为辫状河冲积平原环境,沉积了一套中—粗粒碎屑岩,偶夹薄层炭质泥岩或薄煤层,底部底砾岩发育,厚约 150m;上段为主含煤层段,为湖泊—沼泽环境的深灰色粉砂岩、细粒砂岩及灰色细—中粒砂岩、粗粒砂岩,夹二层主煤层下₁和下₂煤,平均厚 78.66m。江仓组按岩性也可细分为上、下两段,其中下段为三角洲—湖泊环境的灰色细粒砂岩、中粒砂岩及深灰色泥岩、粉砂岩,含煤 2~6 层,厚度平均 125.10m;上段为纸片状页岩(含油页岩)段,为一套浅湖—半深湖环境的细碎屑泥岩、粉砂岩,夹灰色粉砂岩及透镜状菱铁矿层,厚度平均 112.11m。上侏罗统为干旱

气候下的河流冲积环境,以黄、紫、紫灰色砾岩为主,夹灰黄色厚层状粗砂岩。第四系在钻探区内广泛分布,为冲积、洪积成因的腐植土、砂、砾石,坡积的角砾,冰积的泥砂、冰层、漂砾等。

2 天然气水合物钻探试验井施工情况

2008 年 10 月 18 日,“祁连山冻土区天然气水合物 DK-1 科学钻探试验孔”(图 4)开始施工,其地理坐标为北纬 38°05.591',东经 99°10.260',海拔 4057m,2008 年 11 月 26 日终孔,进尺 182.25m。2009 年 5 月 31 日~8 月 12 日,在 DK-1 孔南南西向(沿地层倾向)约 22m 处施工 DK-2 孔,进尺 645.22m。2009 年 8 月 16 日~10 月 11 日,在 DK-1 孔南东东向(沿地层走向)约 12m 处施工 DK-3 孔,进尺 765.01m。2009 年 9 月 4 日~10 月 1 日,在 DK-1 孔北北东向(沿地层倾向)约 250m 处施工 DK-4 孔,进尺 466.65m。迄今共完成 DK-1、DK-2、DK-3 和 DK-4 孔的钻探施工任务,总进尺 2059.13m。

鉴于我国冻土水合物钻探施工无先例可循、无经验可借鉴的实际情况,为确保“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”的成功实施,项目组克服了高原冻土施工和水合物采集、保存过程中的一系列技术难关,探索出一套以钻探为主,地质、地球物理、地球化学和分析测试为辅的冻土区天然气水合物钻探施工和调查研究方法,包括:大孔径绳索取芯、低温泥浆、半合板钻具、PVC 内管等的钻探施工工艺

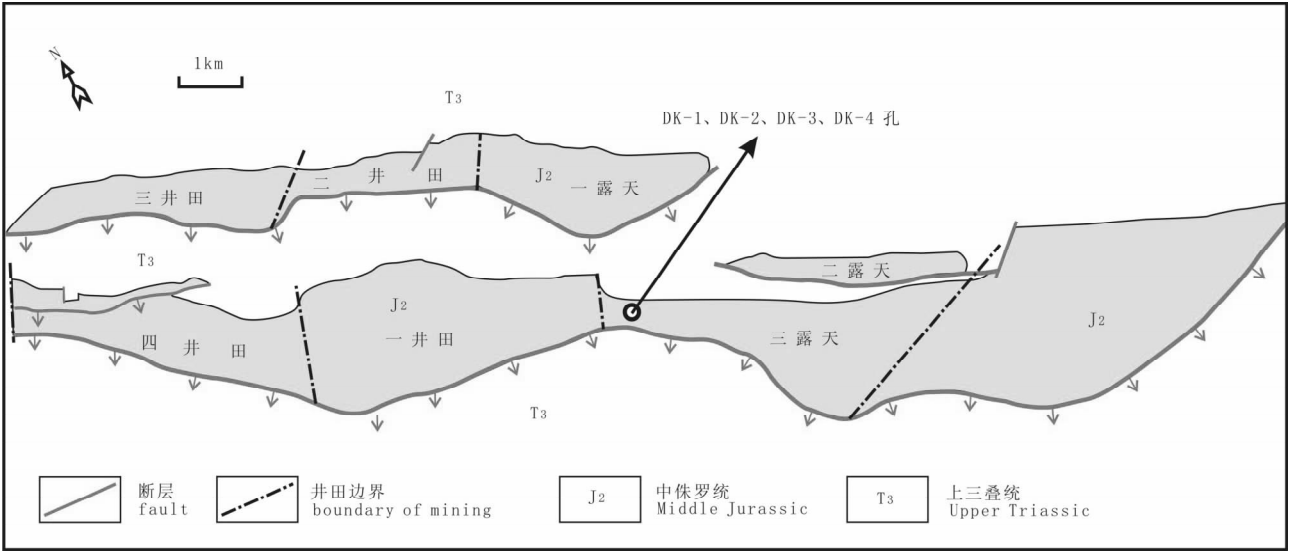


图 2 祁连山冻土区天然气水合物科学钻探试验井位置图(据青海煤炭地质 105 勘探队资料编制)

Fig. 2 The location of drilling sites of the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost (edited from data of Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Team)

系	统	组	厚度	柱状图	岩 性	备注
第四系					腐植土、砂、砾石、土等	
古近系					褐色、紫红色泥岩、粉砂岩、砂岩	
侏罗系	上统				黄色、紫色砾岩、粗砂岩	
	中统	江仓组	445m		上段：纸片状页岩、油页岩、泥岩、粉砂岩 下段：灰色细粒砂岩、中粒砂岩及深灰色泥岩、粉砂岩，夹煤层	水合物层
		木里组	307m		上段：深灰色粉砂岩、细砂岩，夹二层主煤层 下段：灰色厚层状中-粗粒砂岩，夹粉砂岩、炭质泥岩、薄煤层	下 ₁ 煤 下 ₂ 煤
三叠系	上统				黑色粉砂岩、泥岩，夹薄煤层	

图 3 祁连山木里煤田聚乎更矿区综合地层柱状图
(据青海煤炭地质 105 勘探队资料编制)

Fig. 3 Sequence-stratigraphic nomenclature of the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost (edited from data of Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Team)



图 4 祁连山冻土区天然气水合物 DK-1 科学钻探试验孔
Fig. 4 The photograph of Hole DK-1 of the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost

和取芯技术；现场岩芯观测、红外测温、样品采集、液氮罐保存、激光拉曼光谱仪测试的水合物样品观测、采集、保存、测试技术；常规煤田测井加地质雷达的综合测井方法及数据处理、解释技术等，初步满足了本工程的实际需要。

此外，根据野外调查研究工作的迫切需要，项目组还初步研发出一系列具有自主知识产权的冻土区天然气水合物调查研究装备，包括冻土区天然气水合物现场简易实验室；冻土区天然气水合物泥浆制冷系统；天然气水合物孔底冷冻取样器；天然气水合物样品快速冷冻装置和天然气水合物样品低温高压保存运输装置等，为本工程的钻探及样品采集、保存、运输提供了基本的技术保障。

3 天然气水合物主要证据

2008 年 11 月 5 日，我们在 DK-1 孔井深 133.5～135.5m 区间首次钻获天然气水合物实物样品，之后又相继于 142.9～147.7m、165.3～165.5m 发现天然气水合物。2009 年分别在 DK-2 和 DK-3 孔的多个层位再次钻获天然气水合物实物样品，并在 DK-4 孔发现一系列与天然气水合物有关的异常标

志。目前发现天然气水合物的主要证据包括现场观测、室内测试分析和地球物理测井三大部分。

在岩芯裂隙面上可观测到薄层白色、乳白色的天然气水合物晶体,有的则因泥浆污染而呈土黄色,且点火就能直接燃烧(图 5),燃烧时间长短不一,最长可持续到 1 分钟以上。含天然气水合物的岩芯经红外热像仪(FLIR T200 型)测温后显示出明显的低温异常,为天然气水合物分解降温的典型标志。在干净的岩芯面上能不断冒出气泡和水滴,表明天然气水合物分解后释放出烃类气体和水。含天然气水合物的岩芯放进水里能强烈冒泡,放进瓦斯罐内能在 24 小时解析出超过 150 毫升的气体,且在钻探过程中时常遇到异常气体,这些现象均表明水合物分解后能释放出大量气体。在天然气水合物层段的岩芯中发现水合物分解后残留的蜂窝状构造。在岩芯裂隙面上发现晶形完好的自生碳酸盐及黄铁矿矿物。这些均是野外鉴定天然气水合物的重要证据,尤以白色晶体、点火燃烧和红外低温异常最为重要。

现场采获的天然气水合物样品经液氮保存后直接运往青岛,经青岛海洋地质研究所用 inVia 型激光拉曼光谱仪检测,结果显示典型的天然气水合物特征拉曼光谱曲线(图 6)。所获实物样品的光谱曲线与青岛海洋地质研究所人工合成样品的光谱曲线极为相似,也与国外的人工合成样品以及墨西哥湾海底实物样品非常接近(图 6),从而证实所获样品确为天然气水合物。同时,激光拉曼光谱的测试结果还显示,祁连山木里地区钻获的天然气水合物除含甲烷外,还含有较高的乙烷、丙烷等重烃组分,部分样品甚至还含有较高的二氧化碳。此外,初步的测试结果表明该地区的天然气水合物有可能为 sII 型结构水合物。在 II 结构水合物中,小笼是大笼的两倍,因此小笼中甲烷的拉曼强度应该为大笼的两倍,但祁连山水合物小笼中甲烷的拉曼强度远远大于大笼,可能是由于乙烷、丙烷等大分子只能占据大笼,使得甲烷分子在大笼中相对较少,而在小笼中相对较多造成的。



图 5 祁连山冻土区白色、乳白色天然气水合物晶体及其燃烧照片

Fig. 5 The photographs of crystalline gas hydrates and burning from the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost

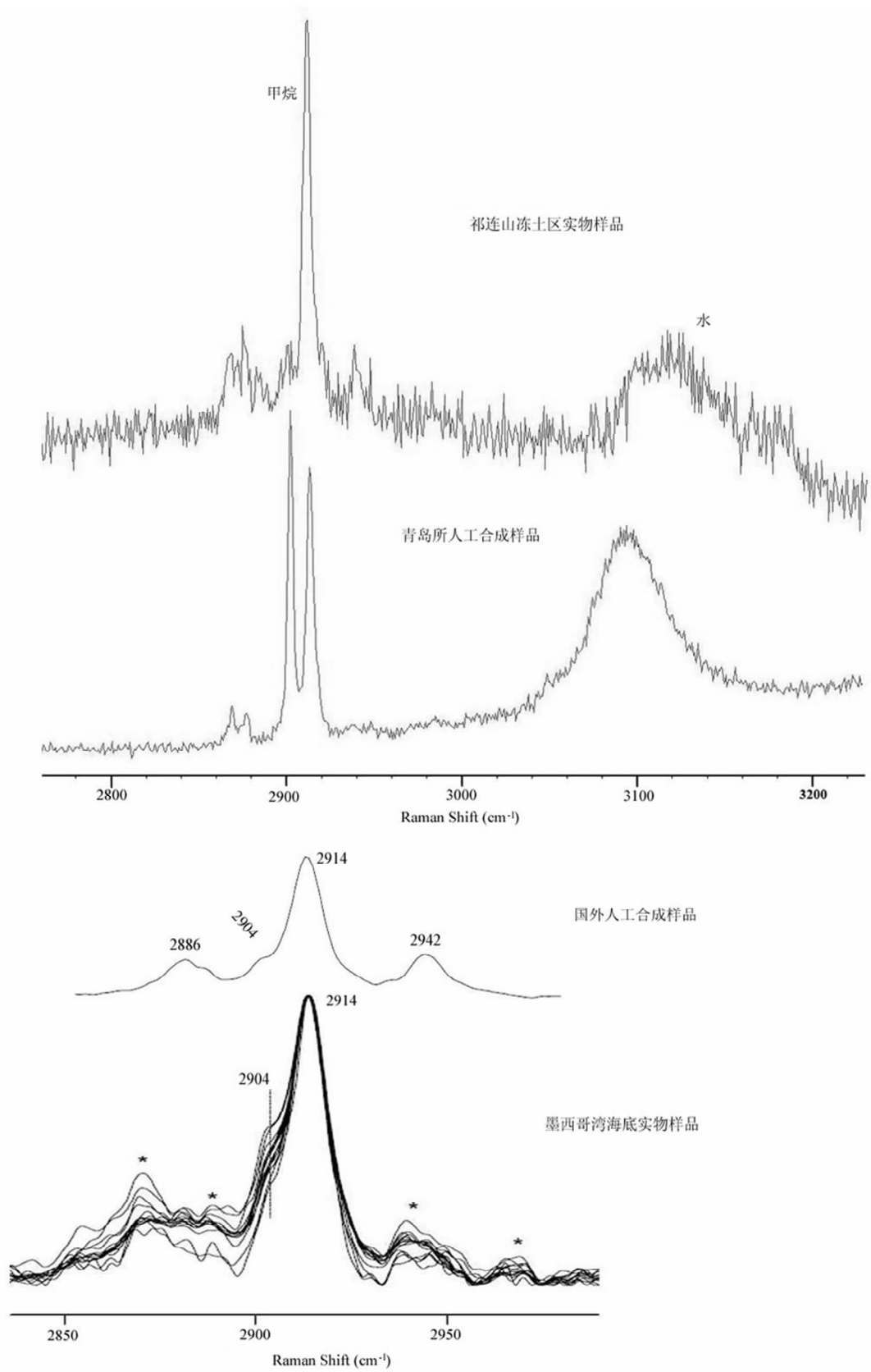


图 6 祁连山冻土区 DK-2 孔天然气水合物的激光拉曼光谱曲线及其对比图
Fig. 6 Comparison of Raman spectra of hydrate from the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost, synthetic sample in laboratory and in situ samples from Mexico gulf

测井标志是确定天然气水合物的重要标志之一,特别是在冻土区更为重要,阿拉斯加北部斜坡和加拿大 Mackenzie 三角洲的天然气水合物均是首先利用测井资料进行综合分析发现的。一般说来,天然气水合物层的密度都小于同类沉积层,含水合物层的电阻率普遍大于普通沉积物,含水合物层的纵波速度与横波速度增加,且含水合物沉积层的天然伽玛、中子孔隙度也有小幅度降低。因此,可利用这些特征来推断是否存在天然气水合物,其中高电阻率与高声波是判断天然气水合物的最重要证据。我们对 4 个钻探试验孔均进行了常规煤田测井,测井参数包括自然电位、电阻率、三测向电阻率、声速、天然伽玛、人工伽玛、密度、井径和井温等 9 项,并对 DK-4 孔探索性地开展了地质雷达测井,结果显示含天然气水合物层段均呈现出较明显的高电阻率和高波速特征,部分层段的密度及天然伽玛也有小幅度降低(图 7),再次证实该层段存在天然气水合物。

4 天然气水合物基本特征

祁连山木里地区钻获的天然气水合物均位于冻土层之下。大量的实测资料表明,祁连山冻土区的冻土层厚度为 8.0~139.3m,木里地区为 60~95m(周幼吾等,2000)。青海煤炭地质 105 勘探队的大量钻探结果表明,聚乎更矿区的冻土层厚度较为稳定,其中二露天、三露天的冻土层厚度一般为 60~90m。我们对 DK-1、DK-2 和 DK-3 孔的简易测温结果显示,钻探区内的冻土层厚度约为 95m,但天然气水合物均产于 133m 之下。

迄今在 DK-1、DK-2 和 DK-3 钻获的天然气水合物主要分布于井深 133~396m 区间,其中 DK-1 孔共钻获 3 层天然气水合物,分别位于井深 133.5~135.5m、142.9~147.7m 和 165.3~165.5m 处,并在 169.0~170.5m 处发现高电阻率、高波速标志(图 6)和高压气体异常,推测也可能有天然气水合物,但因岩芯破碎和塌孔事故而未能获取实物样品。在 DK-2 孔共钻获 4 层天然气水合物,分别位于井深 144.4~152.0m、152.3~156.6m、235.0~245.0m、275.0~291.3m 处。在 DK-3 孔共钻获 3 层天然气水合物,分别位于井深 133.0~156.0m、231.0~240.0m 和 392.0~396.0m 处,另在 400m 之下的岩芯中偶尔观测到冒气泡现象,推测也有可能存在天然气水合物。

目前的钻探结果显示,天然气水合物主要赋存于中侏罗统江仓组上段,也即含油页岩段,其次为江

仓组下段,主岩包括细砂岩、泥质粉砂岩、泥岩和油页岩等,但因钻探区内地质构造复杂、断裂发育、岩性变化较大,加之水合物赋存状态复杂,尽管 DK-1、DK-2 和 DK-3 孔相距很近,但各钻孔间天然气水合物层的横向对比难度较大。

祁连山天然气水合物的产出方式可能有二种,一是以薄层状、片状、团块状赋存于粉砂岩、泥岩、油页岩的裂隙面中,单层仅仅数毫米厚,肉眼能观测到的均是这类水合物(图 4)。一是以浸染状赋存于细粉砂岩的孔隙中,这类水合物肉眼难以观测到,但可通过岩芯中不断冒出的气泡和水珠来间接推测存在这类水合物,也可通过红外测温中的分散状低温异常证实有这类水合物。

初步的测试结果显示,祁连山天然气水合物中的气体组分较为复杂,除甲烷外还含有较高的乙烷、丙烷等重烃组分,部分样品中甚至还含有一定量的 CO_2 。无论是水合物样品分解后的气体,还是瓦斯罐中收集的气体,甚至顶空气、泥浆气等,气相色谱分析后的甲烷含量为 54%~76%,乙烷含量为 8%~15%,丙烷含量为 4%~21%,并有少量的丁烷、戊烷等。 CO_2 含量一般为 1%~7%,高的可达 15%~17%。此外,激光拉曼光谱测试结果也表明样品中含有较高的乙烷、丙烷和二氧化碳。

两个水合物样品中甲烷的碳氢同位素分析结果显示,其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值分别为 -39.5‰ 和 -50.5‰(PDB 标准), δD 值为 -266‰ 和 -262‰(VSMOW 标准),并具有 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{i-C}_4 < \delta^{13}\text{n-C}_4$ 特征,显示出明显的深部热解气特征,而不是浅部微生物气。从气体来源上推测其气体主要来自于附近的煤层气,但不排除深部迁移上来的热解气,特别是下伏石炭系暗色泥(灰)岩、下二叠统草地沟组暗色灰岩、上三叠统杂勒得寺组暗色泥岩等烃源岩以及侏罗系油页岩提供的热解气。

与国外发现的水合物相比,祁连山冻土区天然气水合物具有埋深浅、冻土层薄、气体组分复杂、以煤层气为主等明显特征,初步分析应作为一种新类型水合物,具有重要的科学意义。

致谢: 特别感谢国土资源部张洪涛,中国地质调查局钟自然、叶建良、卢民杰、肖桂义、刘凤山对本项工作的大力支持和精心指导。钻探施工由青海煤炭地质 105 勘探队 502、501 钻机承担。参加本项工作的还有矿产资源所的黄霞、白名岗,勘探技术研究所的王汉宝,青海煤炭地质 105 勘探队的邓生义、曹官青、耿庆明、牛索安,吉林大学的孙又宏、郭威、赵江

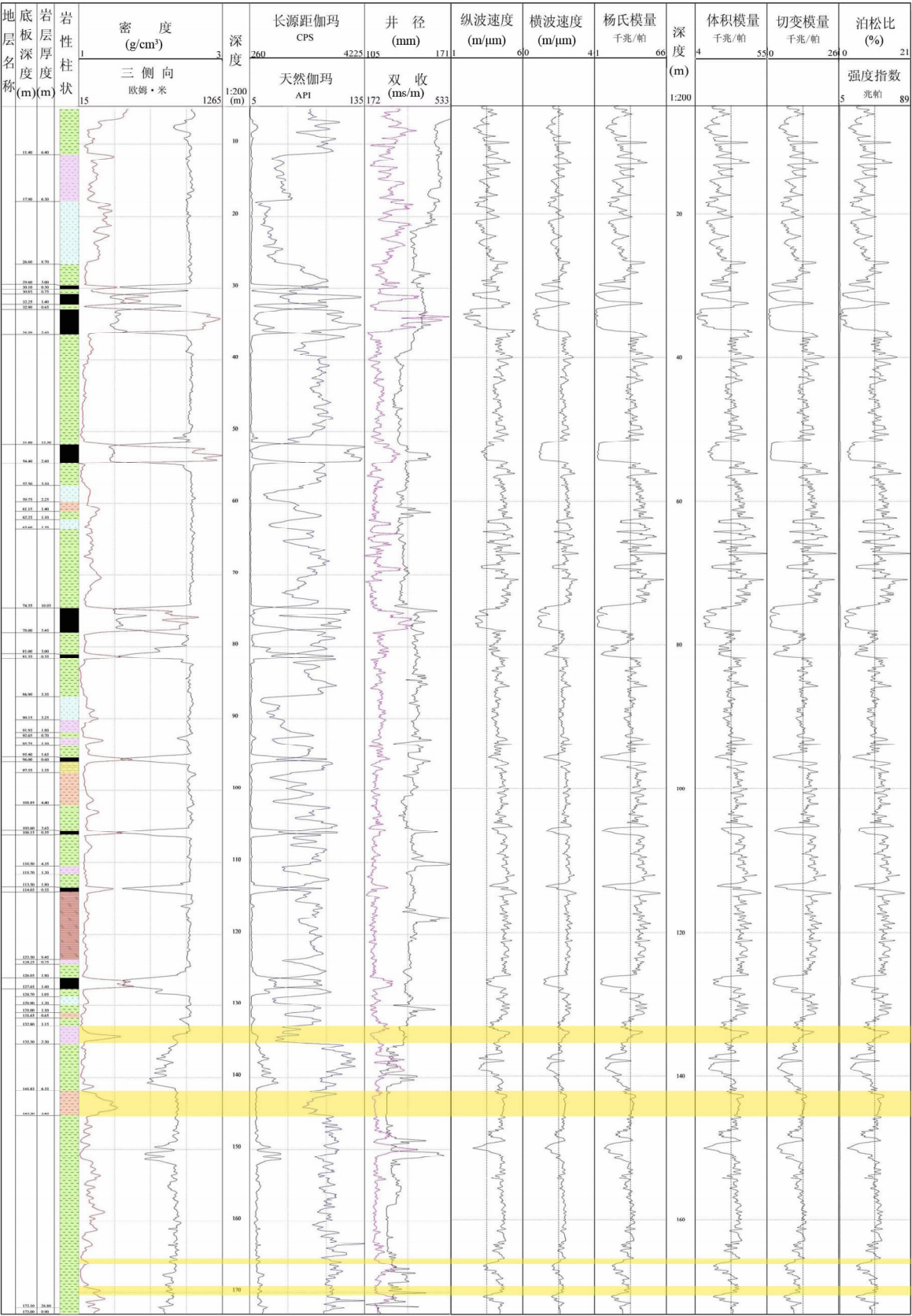


图 7 祁连山冻土区 DK-1 孔测井曲线图

Fig. 7 Well-log of Hole DK-1 from the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost

鹏、李国圣,中国地质大学(北京)的苏新、庞守吉、于森、杨旭,北京化工大学吕杰、韩路、李建华、武淑娇等。野外工作期间得到了青海省委省政府、青海省国土资源厅、青海省煤炭地质局、海西州、天峻县和青海煤炭地质 105 勘探队各级领导的大力支持和无私帮助。在此一并深表谢意!

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. 地球物理学报, 48(1):165~172.

冯益民. 1997. 祁连造山带研究概况——历史、现状及展望. 地球科学进展, 12(4):307~314.

符俊辉,周立发. 1998. 南祁连盆地石炭—侏罗纪地层区划及石油地质特征. 西北地质科学, 19(2):47~54.

黄朋,潘桂棠,王立全,胡宁静. 2002. 青藏高原天然气水合物资源预测. 地质通报, 21(11):794~798.

坚润堂,李峰,王造成. 2009. 青藏高原多年冻土区活动带天然气水合物异常特征. 西南石油大学学报(自然科学版), 31(2):13~17.

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. 西北地质, 37(4):33~38.

卢振权,吴必豪,饶竹,祝有海,罗续荣,白瑞梅. 2007. 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. 地质通报, 26(8):1029~1040.

库新勃,吴青柏,蒋观利. 2007. 青藏高原多年冻土区天然气水合物可能分布范围研究. 天然气地球科学, 18(4):588~592.

文怀军,鲁静,尚璐君,刘天绩,陈江峰,鞠崎,邵龙义. 2006. 青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系层序地层研究. 中国煤田地质, 18(5):19~21.

吴青柏,蒋观利,蒲毅彬,邓友生. 2006. 青藏高原天然气水合物的形成与多年冻土的关系. 地质通报, 25(1-2):29~33.

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. 地球科学进展, 14(2):201~204.

伊海生,时志强,刘文军. 2002. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成潜力及远景. 西藏地质, 20(1):46~49.

张立新,徐学祖,马巍. 2001. 青藏高原多年冻土与天然气水合物. 天然气地球科学, 12(1-2):22~26.

周幼吾,郭东信,邱国庆,程国栋,李树德. 2000. 中国冻土. 北京:科学出版社.

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. 地质通报, 25(1-2):58~63.

Collett T S. 1993. Permafrost-associated gas hydrate accumulations. In Sloan E D, Happer J, Hnatow M ed. International Conference on Natural Gas Hydrates. Annals of the New York Academy of Science, 715: 247~269.

Collett T S, Dallimore S R. 2000. Permafrost-related natural gas hydrate. In Max M D ed. Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 43~60.

Dallimore S R, Collett T S. 1999. Regional gas hydrate occurrences, permafrost conditions, and Cenozoic geology, Mackenzie Delta area. In Dallimore S R, Uchida T, Collett T S ed. Scientific Results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bulletin, 544: 31~43.

Dallimore S R, Collett T S. Summary and implication of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program. In Dallimore S R and Collett T S ed. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bulletin, 2005, 585: 1~36.

Kvenvolden K A. 1988. Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? Chemical Geology, 71: 41~51.

Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. 2007. Natural gas-hydrates—A potential energy source for the 21st Century. Journal of Petroleum Science and Engineering, 56: 14~31.

Sloan E D. 1998. Clathrate Hydrates of Natural Gases (second edit). New York: Marcel Dekker Inc., 1~628.

Gas Hydrates in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai, Northwest China

ZHU Youhai¹⁾, ZHANG Yongqin²⁾, WEN Huaijun³⁾, LU Zhenquan¹⁾, JIA Zhiyao³⁾, LI Yonghong³⁾,
LI Qinghai³⁾, LIU Changling⁴⁾, WANG Pingkang¹⁾, GUO Xingwang¹⁾

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037; 2) Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei, 065000; 3) Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Team, Xi'ning, Qinghai, 810007; 4) Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, Shandong, 266071

Abstract

Qilian Mountain permafrost, with an area of about $10 \times 10^4 \text{ km}^2$, is located in the north of Qinghai-Tibet plateau. It has of perfect conditions and great prospecting potential for gas hydrate. The Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in the Qilian Mountain permafrost, which locates at the Jugenghu Mining Area in the Muli Coalfield, Tianjun County, Qinghai Province, has been implemented by China Geological Survey in 2008~2009. Four scientific drilling wells have been completed with a total footage of 2059. 13m. Samples of gas hydrate were collected separately in the holes of DK-1, DK-2 and DK-3. Gas hydrate is hosted under permafrost zone at the 133~396m interval. The samples are white or ivory crystal and easily burning. Distinct low temperature anomaly has been identified by infrared camera. The gas hydrate-bearing cores strongly bubble in water. Gas-bubble and water-drop emit from the samples and then retain characteristic honeycombed structure. The typical spectrum curve of gas hydrate is detected using Raman spectrometry. Furthermore, the logging profile also indicates high electrical resistivity and sonic velocity. Gas hydrate in Qilian Mountain is found within a thinner permafrost zone with a shallower buried depth and characterized by more complex gas component and coalbed methane origin, suggesting a new type of hydrate.

Key words: gas hydrate; permafrost; Qilian Mountain

欢迎使用下列刊物网上投稿系统投稿

下列刊物已经实现网上投稿,欢迎上网查阅、投稿

- 《地质学报(英文版)》 <http://www.geojournals.cn/dzxbcn/>
- 《地质学报(中文版)》 <http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>
- 《地质论评》 <http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>
- 《岩石矿物学杂志》 <http://www.yskw.ac.cn/ch/index.aspx>
- 《岩矿测试》 <http://www.ykcs.ac.cn/ch/index.aspx>
- 《矿床地质》 <http://www.kcdz.ac.cn>
- 《地球学报》 <http://www.cagsbulletin.com/dqxbcn/ch/index.aspx>
- 《中国岩溶》 <http://www.karstjournal.ac.cn>
- 《地质力学学报》 <http://www.geomech.ac.cn/library/newpage4.htm>