

祁连山冻土区天然气水合物科学钻探试验井中侏罗统的沉积学特征

庞守吉¹, 苏新¹, 杨旭¹, 王平康², 李永红³, 郭星旺², 李清海³

PANG Shou-ji¹, SU Xin¹, YANG Xu¹, WANG Ping-kang²,

LI Yong-hong³, GUO Xing-wang², LI Qing-hai³

1. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3. 青海煤炭地质 105 勘探队, 青海 西宁 810007

1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

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

3. Qinghai No.105 Geological Exploration Party for Coal Resources, Xining 810007, Qinghai, China

摘要:对青海祁连山冻土区天然气水合物钻井(DK-3)岩心进行了沉积学分析。根据对钻井地层特征、粒度、矿物含量的综合分析,在DK-3钻井揭露的中侏罗统中识别出4种沉积相类型,并完成了沉积微相的划分。伴随地层由老到新,沉积环境由最初发育的辫状河过渡到相对稳定的湖泊(辫状河→湖泊→曲流河三角洲→湖泊)。在133~156m和225.1~240m井段的岩层中发现的天然气水合物,主要呈薄层状分布于岩石裂隙面上;而在367.7~396m井段,天然气水合物除存在于岩石裂隙中外,在砂岩孔隙中亦大量存在。天然气水合物的产出与沉积环境、构造条件有着密切的联系。

关键词:天然气水合物;冻土区;沉积环境;粒度;XRD;祁连山

中图分类号:P618.13; P534.52 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2011)12-1829-10

Pang S J, Su X, Yang X, Wang P K, Li Y H, Guo X W, Li Q H. Sedimentological features of Middle Jurassic strata revealed by scientific drilling boreholes of natural gas hydrate in Qilian Mountain permafrost. *Geological Bulletin of China*, 2011,30(12):1829-1838

Abstract: A sedimentological study of natural gas hydrate borehole DK-3 was carried out. All the core samples were collected from Qilian Mountain permafrost. Through a comprehensive analysis of stratigraphy, grain size and XRD of the samples, four types of Middle Jurassic sedimentary facies were recognized. With the variation of the strata from old to young, the sedimentary facies evolved gradually from braided river, meandering river, meandering river delta to lake facies, together with the changes of microfacies. The natural gas hydrate existent in 133-156 m and 225.1-240 m is mainly distributed in flaggy-shaped rock fractures. In 367.7-396 m, the natural gas hydrate not only exists in the rock fractures but also is abundant in sandstone pores. It is concluded that the distribution and storage of natural gas hydrate is closely related to the sedimentary environment and structural conditions.

Key words: natural gas hydrate; permafrost; sedimentary environment; grain size; XRD; Qilian Mountain

天然气水合物主要分布于陆地多年冻土区和海洋大陆架边缘、陆坡沉积物中。据估计,全球天然气水合物中碳的储量为 $2\times 10^{16}\text{m}^3$,相当于全球常规化

石燃料总碳量的2倍以上^[1]。前人已经开展了对海域天然气水合物的成藏条件和沉积特征的研究^[2-9],对陆域冻土区天然气水合物的研究则集中在多年冻

收稿日期:2011-08-31;修订日期:2011-10-19

资助项目:中国地质调查局项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》(编号:1212010818055)

作者简介:庞守吉(1982-),男,在读博士,海洋地质专业。E-mail: psj0409@163.com

通讯作者:苏新(1957-),女,教授,博士生导师,从事微体古生物、海洋地质、天然气水合物调查与研究。E-mail: xsu@cugb.edu.cn

土与天然气水合物之间的关系^[10-14],以及天然气水合物蕴藏状况^[11,15]方面,对天然气水合物成藏的有利沉积条件还有待于深入研究。2008 年和 2009 年,中国地质调查局在青海省祁连山南缘多年冻土区实施了一系列天然气水合物科学钻探工程,采集到了天然气水合物实物样品,实现了中国陆域天然气水合物找矿的突破^[16]。笔者对所钻获的钻井岩心开展了沉积学研究,本文展示部分研究成果。

1 研究区地质背景

在 2008 年和 2009 年,项目组共钻探 4 口钻井(DK-1、DK-2、DK-3 和 DK-4),均位于青海省祁连山南缘,地处木里煤田聚乎更矿区三露天井田。4 口钻井之间的距离较近,DK-2、DK-3、DK-4 钻井离 DK-1 的距离分别为 22m、12m 和 250m(图 1)。构造单元属南祁连盆地的木里拗陷西端,出露的地层除第四系外,还包括中侏罗统江仓组 and 木里组^[17-18]。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,含植物化石 *Neocalamites* sp., *Cladophlebis denticulata*, *Coniopteris hymenophylloides*, *Equisetites* sp., *Podozamites* sp., *Phoenicopsis* sp. 等^[19-20]。

据前人研究^[17-20],研究区中部为三叠系组成的一个复式背斜,南、北两侧为侏罗系含煤地层组成的

2 个向斜,含油页岩,灰白、灰黑色砂岩,泥岩夹炭质泥岩及煤层。木里组下段为辫状河冲积平原环境沉积的一套粗碎屑岩,底部砾岩发育;上段以湖泊—沼泽环境为主,发育本区主要可采煤层下₁和下₂两层。江仓组下段主要为三角洲—湖泊沉积环境,含煤 2~6 层;上段以浅湖—半深湖环境为主,不含煤。

此外,研究区属多年冻土区,介于托来南山和大通山之间,海拔一般为 4000~4300m,是祁连山冻土区的中心地区,除局部地段外,多年冻土连续分布。其最大季节融化深度达 4.5m,季节融化层底面年平均地温为-1.2~-3.6℃。盆地内季节融深主要受岩性和含水量的制约,以山前缓坡和二级阶地沼泽化地段最深,在残丘地段最浅^[21]。

2 样品与分析方法

在野外对钻井岩心进行了系统的观察和描述,采集了代表性样品,尤其注重含天然气水合物岩心段的采样,在室内开展了系统的沉积学研究。本文展示代表性钻井 DK-3 样品的粒度、X 射线衍射(XRD)的分析结果。

2.1 粒度分析

粒度分析采用全样,在中国地质大学(北京)海洋学院激光粒度分析室利用 Malvern Mastersizer 2000 检测设备进行测试,分析标准依据《碎屑岩粒

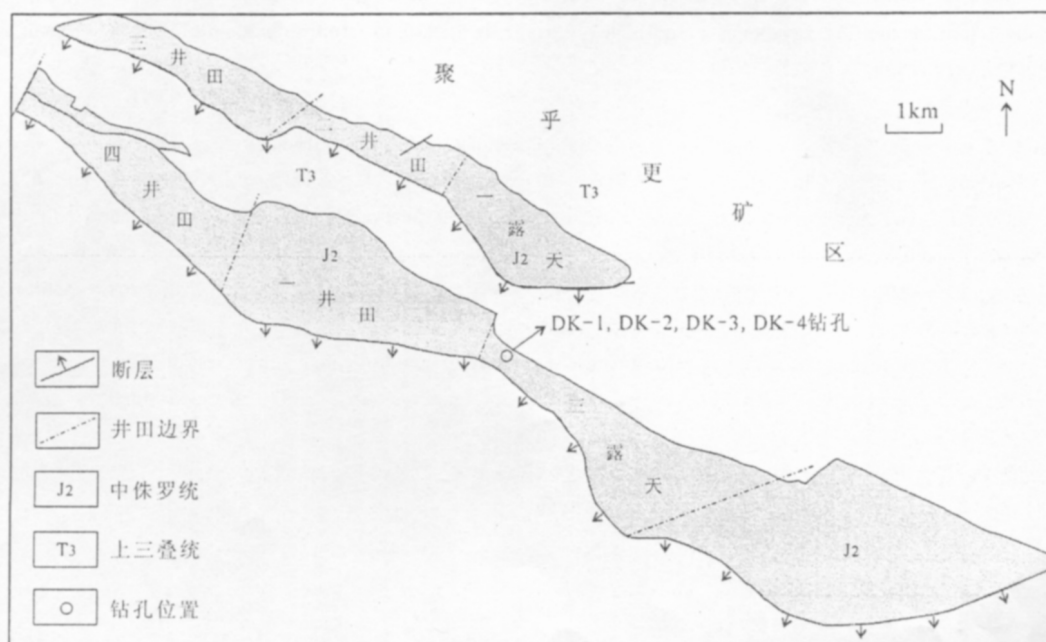


图 1 祁连山冻土区天然气水合物勘探钻井位置(据青海煤炭地质 105 勘探队资料编制)

Fig. 1 Locations of drilling holes of natural gas hydrate in Qilian Mountain permafrost

度分析方法》SY/T 5434-1999。

首先将样品破碎成适当的小块,对不同胶结物的处理方法是:

(1)方解石胶结:用过量 10%~15%的盐酸溶解,反应到无气泡产生为止;

(2)白云石胶结或磷铁矿胶结:用过量 10%~15%的盐酸加热煮沸 30 min 以上;

(3)氧化铁、氢氧化铁或硬石膏胶结:用过量 20%的盐酸加热煮沸 30 min 以上;

(4)黄铁矿胶结:用过量 5%~10%的硝酸加热煮沸 30 min 以上;

(5)富含有机质样品:用过量 15%~20%的过氧化氢溶液处理到无气泡产生为止;

(6)粘土矿物及石膏胶结:用清水浸泡,并酌情加热。

上述进行酸处理的样品,待反应完毕用水反复冲洗,直至 pH 试纸显示中性为止。然后采用英国马尔文(MALVERN)公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪测试,测量范围为 0.02~2000 μm ,偏差小于 1%。

2.2 XRD 分析

XRD 分析在中国石油勘探开发研究院利用日本理学电机公司生产的 D/MAX 2500 型 XRD 仪进行测试,包括全岩和粘土矿物分析。分析标准依据《沉积岩中粘土矿物总量和常见非粘土矿物 X 射线衍射定量分析方法》(SY/T 6210-1996)。

3 沉积学特征分析

3.1 地层划分

研究区出露的地层除第四系外,还包括中侏罗统江仓组和木里组。木里组和江仓组的定义发生过一系列复杂的沿革^[20],地层单位之间存在较大的差别。青海煤炭地质 105 勘探队在该区域进行过多年的勘探调查,本文采取青海煤炭地质 105 勘探队对本研究区地层惯用的划分法,即木里组下段为一套粗碎屑岩,底部砾岩发育;上段发育本区主要的可采煤层下₁和下₂煤层。江仓组下段主要为薄层砂岩夹泥岩,煤层多而薄;上段主要为厚层油页岩,不含煤。江仓组上、下段以厚层油页岩分界。

在前人勘探成果和煤层、地层界线划分等的基础上,综合分析已有的地层资料,并结合现场钻井岩心编录,对井下地层进行了划分和对比。钻探区下部

发育的上三叠统与之上的中侏罗统呈平行不整合接触。DK-2 钻井 140.1m 之上和 DK-3 钻井 108.85m 之上为逆冲断层推覆来的老地层(江仓组下段 J_2j^1 ,图 2),与深部地层重复,本文仅对此断层之下至木里组下段地层沉积环境的变化做深入的探讨。

3.2 粒度特征及变化

3.2.1 粒度特征

DK-3 钻井 130 块岩心样品的粒度测试结果显示,样品的平均粒径介于 0.79~8.75 Φ 之间,以粉砂为主体;分选系数范围在 1.23~3.22 之间,分选较差或差;偏度范围为 -0.2~1.43,近于对称或为正偏态,部分层段以粗组分占优;峰度范围为 0.62~1.8,多属平坦或中等,个别样品为尖锐,频率曲线多为单峰对称正态曲线或表现出双峰的特点。

3.2.2 粒度垂向变化

据粒度数据对钻井岩性进行校正并做柱状剖面图,各粒度组分及其主要参数对比如图 2 所示。从图 2 中可以看出,随深度变化,岩石组分和各参数整体呈现出 4 种不同的变化趋势,分别标记为 A (108.85~364.5m)、B (364.5~548.86m)、C (548.86~718.4m)、D (718.4~755.05m) 层段。

A 层段以灰褐色—灰黑色油页岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩为主,局部夹少量(浅)灰色砂质粉砂岩。随深度变化,砂与粉砂、粘土表现为较好的负相关性,除顶部(108.85~116.4m)外,平均粒径、分选系数、偏度和峰度变化不大,岩性和厚度变化基本保持稳定。水动力条件较弱,沉积环境较为稳定。

B 层段以(深)灰色砂质粉砂岩、灰白—浅灰色粉砂质砂岩为主,局部夹深灰色粉砂质泥岩、炭质泥岩或含砾砂岩,夹薄煤层,岩性变化频率较高。随深度变化,粒度主要组分在砂和粉砂间交替变化,且震荡幅度较大。平均粒径、分选系数、偏度和峰度亦随岩性做交替变化。水动力条件强弱频繁变化,沉积环境复杂多变。

C 层段以灰白—浅灰色粉砂质砂岩、(深)灰色泥质粉砂岩为主,局部夹深灰色炭质泥岩、粉砂质泥岩,见厚煤层。粒度组分亦随岩性交替变化,但变化频率较 B 层段低,同岩性沉积层较厚。

D 层段以浅灰色、灰白色含砾砂岩为主,偶夹有灰色粉砂岩或泥质粉砂岩。分选差,多呈正偏态,以粗组分为主。峰度中等或尖锐,频率曲线多表现为双峰不对称。水动力条件较强,沉积环境较稳定。

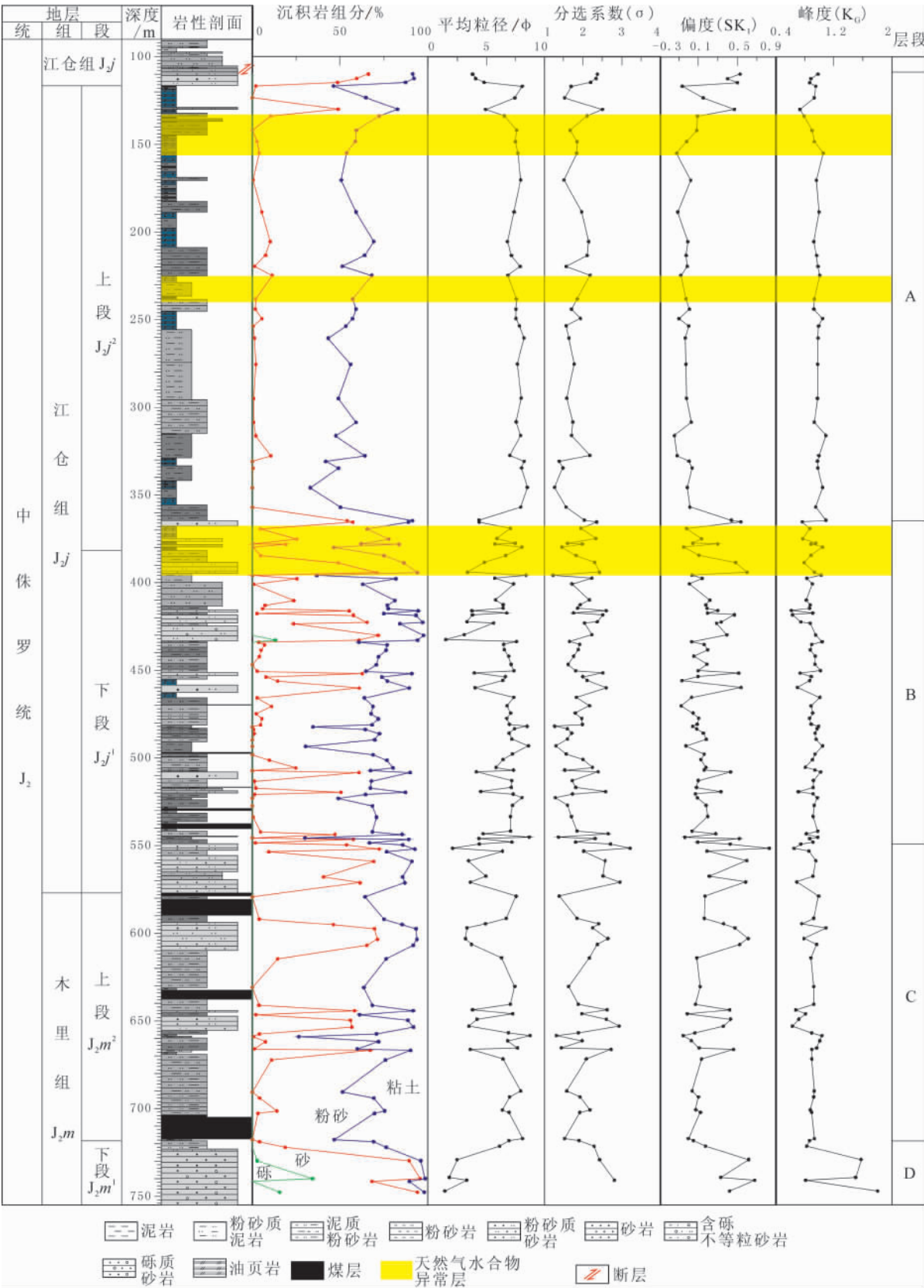


图 2 DK-3 钻井岩性剖面与粒度组分随深度的变化(天然气水合物层深度引自参考文献[22],下同)
Fig. 2 Lithology of borehole DK-3 core and variation of grain-size with depth

3.3 矿物学特征

3.3.1 全岩矿物学特征

在研究层段中选取19块岩心进行了XRD分析,全岩样品的XRD测试结果见表1。矿物成分以石英(Q)和粘土矿物为主,两者含量受粒度控制明显。随深度变化,石英与粘土矿物大致呈镜像关系(图3),即石英的减少意味着粘土矿物的增加。

张世涛等^[23]对星云湖表层沉积物中矿物组成的研究表明,当水体进入湖区时,由于物理搬运作用减弱,岩石中的难溶矿物(如石英、长石等)以机械的物理形式迁移至湖泊的量减少,而易溶矿物组分(如方解石等)可以离子或胶体状态随地表水和地下水以化学侵蚀形式迁移入湖。所以,在水体进入湖泊之前水动力较强,石英、长石等含量相对较高,当水体进入湖泊后水动力条件变弱时,易溶矿物组分方解石等的沉积开始增加。

在DK-3钻井的B、C层段中,石英含量较高,不含方解石;向上过渡到A层段,石英含量降低,出现方解石,其水动力条件变弱、水体变深。

3.3.2 粘土矿物的特征

岩心样品粘土矿物的XRD测试结果见表2。矿物成分包括高岭石(Ka)、伊利石(I)、伊利石/蒙皂石混层矿物(I/S)及少量绿泥石(Chl),不含蒙皂石。随深度变化,伊利石和伊/蒙混层矿物在B层段较A层段含量高,整体变化趋势与高岭石相反(图3)。

前人研究发现^[24-30],粘土矿物的种类和组合可以反映物源区气候、母岩类型、沉积环境的水介质性质、水动力条件等。一般来说,高岭石是在潮湿气候下酸性环境中由岩石强烈淋滤形成的,其粒径相对较大。伊利石是粘土矿物中最稳定的物相,可在不同气候条件和不同碱性环境中形成,属于典型的风化产物,自生伊利石常与富 K^+ 的碱性介质有关。绿泥石对风化作用极为敏感,因此在热带和亚热带土壤中极为罕见,主要是埋藏后经成岩作用形成的,尤其是在富镁的孔隙水中容易沉淀。蒙皂石形成于碱性介质环境,并且与基性火山岩有关。伊利石/蒙皂石混层矿物主要是成岩作用过程中蒙皂石向伊利石转化的过渡产物。同时,在扫描电镜下,粘土矿物的粒径大小不一样,高岭石、伊利石较大,一般为 $2\sim 4\mu m$,而蒙皂石较小,仅 $0.1\mu m$ 或更小^[31]。因此,在沉积过程中这些不同粒径的粘土颗

粒会随水动力条件的逐渐减弱而依次沉积高岭石、伊利石和蒙皂石,这种粒径大小造成的分异作用在河口地区更明显^[32-33]。

在水动力条件频繁变化的B、C层段,高岭石含量较高,说明其水动力条件相对较强,且水体酸性较强;向上过渡到A层段,除顶部(108.85~116.4m)外,高岭石含量降低,碎屑矿物由钾长石向斜长石转变,伊利石含量增加,水动力条件减弱,水体碱性增强。

3.4 沉积环境和沉积相分析

粒度分析作为沉积环境的分析手段已被广泛应用^[34-38]。利用粒度曲线解释沉积环境的思路不是简单地将其与不同环境的标准曲线进行对比,应利用粒度曲线分析搬运介质的性质、能量、能力、沉积物的搬运方式,以及上述诸因素在时间和空间上的展布规律,进而分析粒度曲线所反映的沉积环境意义^[36]。在不同层段选取部分样品做了概率累积曲线和C-M图(图4:C代表累积曲线上颗粒含量1%处对应的粒径,M为累积曲线上颗粒含量50%处对应的粒径),结合地层沉积构造和各粒度组分变化,进行了沉积环境分析和沉积相判断。

(1)D层段:本层段主要为灰白色含砾粗(中)砂岩,颜色较浅,局部见平行层理。概率累积曲线表现为滚动和跳跃次总体占主导(图4),水动力条件强,跳跃次总体斜率小,说明其分选差。C-M图显示,向上过渡带岩性较细,其它深度滚动颗粒占主导。综合考虑粒度参数特征和木里组下段的沉积特征,该层段代表强水动力条件的辫状河沉积,微相类型包括心滩和河漫滩。

(2)C层段:该层段主要为灰色粉砂质砂岩或泥质粉砂岩,岩性出现交替变化,但单层沉积较厚,见厚煤层。水平、波状层理发育,见大量植物叶片化石或碎片化石。概率累积曲线以跳跃次总体为主,滚动次总体减少,分选较D层段好。C-M图显示悬浮、跳跃组分均发育。综合考虑,该层段代表滨浅湖沉积,微相类型包括湖湾、湖滩、沼泽等。

(3)B层段:该层段主要为(深)灰色砂质粉砂岩或泥质粉砂岩,岩性变化频率快且震荡幅度较大,夹薄煤层。发育平行、波状层理,见大量植物叶片化石或碎片化石。水动力条件强弱频繁变化,概率累积曲线以跳跃、悬浮次总体为主。粒度组分频繁变化,震荡幅度较大,沉积环境复杂多变。综合考虑粒度参数

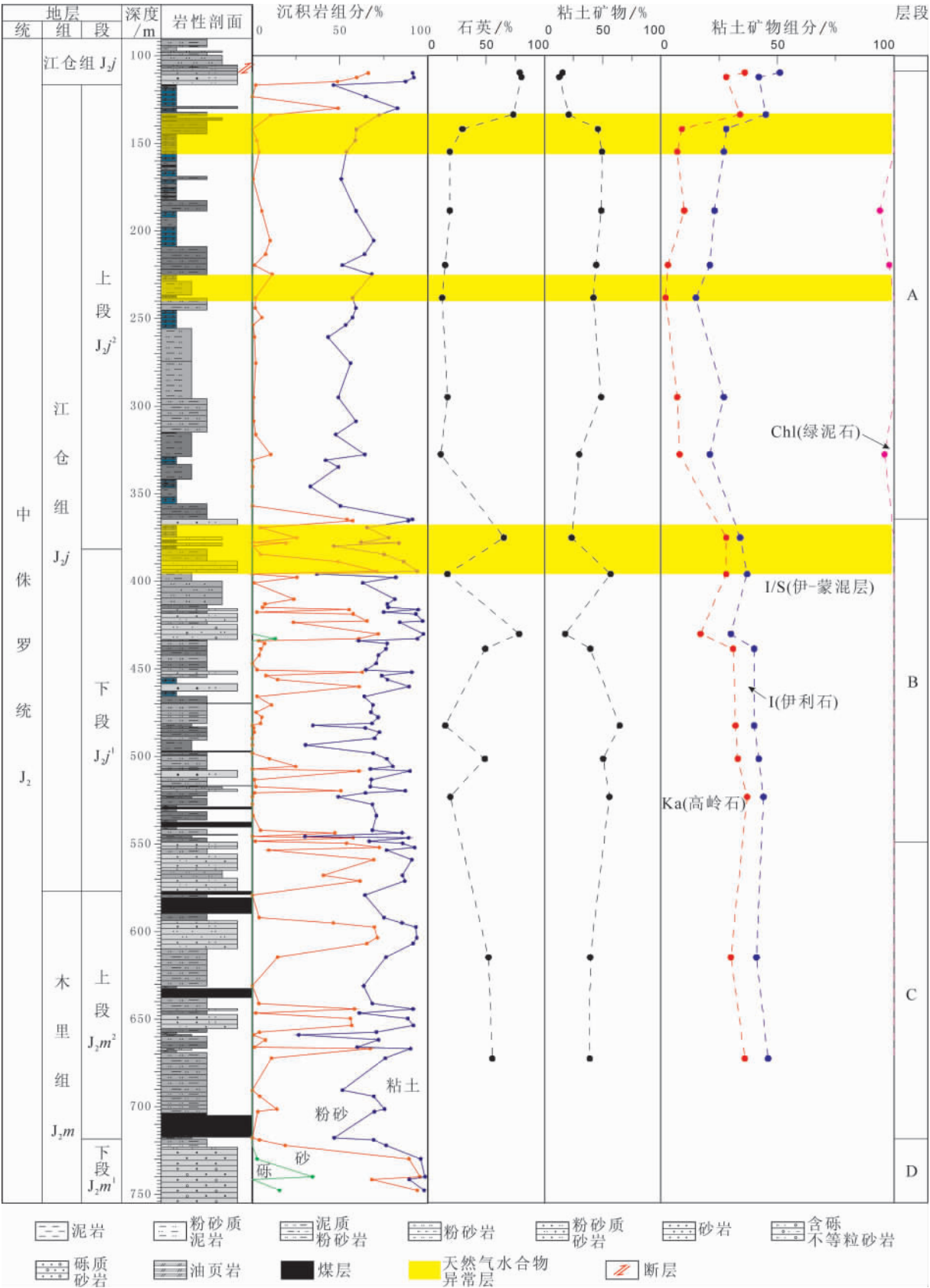


图3 DK-3 钻井岩心、粒度和主要矿物组分随深度的变化

Fig. 3 Lithology of borehole DK-3 core, variation of grain-size and major minerals with depth

表 1 DK-3 钻井岩心样品全岩矿物特征
Table 1 Mineral characteristics of samples from borehole DK-3

样品 编号	深度 /m	岩性	矿 物 种 类 和 含 量 /%									粘土矿 物总量 /%
			石 英	钾 长 石	斜 长 石	方 解 石	镁方 解石	白 云 石	黄 铁 矿	菱 铁 矿	非 晶 质	
DK3-27	109.9	粉砂质砂岩	78.8	1.4	/	0.5	0.6	/	/	3.1	/	15.6
DK3-28	112.4	粉砂质砂岩	80.2	0.7	/	/	/	6.3	/	/	/	12.8
DK3-33	133.8	含砂泥质粉砂岩	73.3	/	5.3	0.5	/	/	/	/	/	20.9
DK3-34	142	泥质粉砂岩	29.7	/	5.7	16.7	/	/	2.0	/	/	45.9
DK3-36	155	泥质粉砂岩	18.9	/	2.9	1.7	/	/	1.0	/	26.0	49.5
DK3-38	188.6	泥质粉砂岩	18.9	/	1.4	/	/	/	1.7	/	29.2	48.8
DK3-41	219.66	泥质粉砂岩	14.9	/	3.1	18.7	/	/	0.9	/	17.9	44.5
DK3-43	238.3	泥质粉砂岩	12.3	/	2.3	15.3	/	5.0	1.0	/	22.0	42.1
DK3-49	295	粉砂质泥岩	16.9	/	4.5	8.3	/	/	1.0	/	20.6	48.7
DK3-52	327.67	含砂泥质粉砂岩	11.1	/	1.4	1.3	/	/	2.4	39.7	14.2	29.9
DK3-60	375.2	含泥砂质粉砂岩	65.1	/	1.4	/	/	6.5	/	3.6		23.4
DK3-67	396	粉砂质泥岩	16.8	/	/	/	/	/	/	/	26.4	56.8
DK3-78	430.1	粉砂质砂岩	78.3	/	/	/	/	3.8	/	/	/	17.9
DK3-132	438.6	泥质粉砂岩	49.2	/	/	/	/	/	/	11.4	/	39.4
DK3-145	482.4	粉砂质泥岩	15.0	/	/	/	/	/	/	/	20.4	64.6
DK3-152	501.4	泥质粉砂岩	48.8	0.7	/	/	/	/	/	/	/	50.5
DK3-161	523.1	粉砂质泥岩	19.3	/	/	/	/	/	/	/	24.9	55.8
DK3-185	614.62	含砂泥质粉砂岩	52.0	1.6	/	/	/	/	/	7.1	/	39.3
DK3-199	672.4	含砂泥质粉砂岩	55.3	0.5	/	/	/	/	/	5.2	/	39.0

特征和江仓组下段的沉积特征，该层段代表水动力条件变化较频繁的曲流河三角洲平原沉积，微相类型包括分流河道、沼泽、决口扇、淡水湖泊等。

(4)A 层段:本层段以灰褐色—灰黑色油页岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩为主，随深度变化各粒度参数变化不大,岩性和厚度变化基本保持稳定。该层段颜色较其它层段深,局部发育波状层理,见雨痕、泥质团块构造,偶见叶肢介化石,水体碱性增强。概率累积曲线和 C-M 图均显示以细粒的悬浮组分为主。水动力条件较弱,沉积环境较为稳定。该段代表水体搬运能力较弱、沉积环境较稳定的滨浅湖和半深湖沉积,微相类型包括湖滩、湖湾等。

综上所述，以粒度组分垂向变化划分出的 A、B、C、D 4 个层段分别对应 4 种不同的沉积相。伴随地层由老到新，沉积环境由最初发育的辫状河过渡到相对稳定的湖泊。

4 含天然气水合物层中水合物产状与岩性对比

DK-3 钻井含天然气水合物层的深度范围分别为 133~156m、225.1~240m 和 367.7~396m^[22](图 2~图 4)。其中,133~156m 和 225.1~240m 两段天然气水合物层所处沉积环境均为半深湖,以油页岩为主,裂隙非常发育,局部岩心破碎,天然气水合物多发现于岩心裂隙断面，呈薄层状分布于裂隙中。367.7~396m 段天然气水合物层所处沉积环境为曲流河三角洲平原,较前 2 段含天然气水合物层岩性变化频繁,以泥质粉砂岩、粉砂质砂岩为主,裂隙发育,岩心较破碎,天然气水合物存在于岩心裂隙中，在粒度较大的砂岩孔隙中亦含有大量天然气水合物(加热后有大量气泡自砂岩中冒出)。

前人研究表明，天然气水合物的形成不仅受

表 2 DK-3 钻井岩心样品粘土矿物特征
Table 2 Clay mineral characteristics of samples from borehole DK-3

样品 编号	深度 /m	岩性	粘土矿物相对含量/%					S 晶层/% (在 I/S 混层中)
			高岭石 (Ka)	伊利石 (I)	绿泥石 (Chl)	蒙皂石 (S)	混层矿物 (I/S)	
DK3-27	109.90	粉砂质砂岩	36	15	/	/	49	25
DK3-28	112.40	粉砂质砂岩	28	14	/	/	58	25
DK3-33	133.80	含砂泥质粉砂岩	34	11	/	/	55	20
DK3-34	142.00	泥质粉砂岩	9	19	/	/	72	20
DK3-36	155.00	泥质粉砂岩	7	20	/	/	73	15
DK3-38	188.60	泥质粉砂岩	10	13	6	/	71	20
DK3-41	219.66	泥质粉砂岩	3	18	2	/	77	20
DK3-43	238.30	泥质粉砂岩	2	13	/	/	85	20
DK3-49	295.00	粉砂质泥岩	7	20	/	/	73	20
DK3-52	327.67	含砂泥质粉砂岩	8	13	4	/	75	25
DK3-60	375.20	含泥砂质粉砂岩	28	6	/	/	66	25
DK3-67	396.00	粉砂质泥岩	28	9	/	/	63	20
DK3-78	430.10	粉砂质砂岩	17	13	/	/	70	25
DK3-132	438.60	泥质粉砂岩	31	9	/	/	60	20
DK3-145	482.40	粉砂质泥岩	32	8	/	/	60	20
DK3-152	501.40	泥质粉砂岩	33	9	/	/	58	20
DK3-161	523.10	粉砂质泥岩	37	7	/	/	56	20
DK3-185	614.62	含砂泥质粉砂岩	30	11	/	/	59	20
DK3-199	672.40	含砂泥质粉砂岩	36	10	/	/	54	20

温压条件的限制，还受岩性特征和构造条件的控制^[39-40]。其聚集不仅与气体来源有关，还与地质构造或地层圈闭有关，能够进入沉积物的流体（气和水）起着关键作用^[41-42]。Winters 等^[43]对加拿大 Mallik 2L-38 井的沉积地层分析发现，有基质支撑和分选好的中细粒砂岩中天然气水合物含量非常高，但在分选较差的粉砂岩中只有较低含量的天然气水合物，在粘土粉砂岩相中则极少发现天然气水合物。这与 DK-3 钻井中天然气水合物层所处的岩性和产出情况明显不同。在 DK-3 钻井中，岩心粒度分选差，133~156m 和 225.1~240m 井段的天然气水合物多呈薄层状分布于岩石裂隙中，可能是本层段中沉积环境水动力条件较弱，沉积的油页岩含量较高，岩心孔隙度较低而多断层、裂隙所致。367.7~396m 井段除岩心裂隙中存在天然气水合物外，粒度较大的砂岩孔隙中亦含有大量天然气水合物，这应该与本层段所处环境水动力条件较强、岩心粒度组分较大、

孔隙度较高有关。由此可见，祁连山冻土区沉积层中天然气水合物的储存、分布、产出与沉积环境、构造条件有着密切的联系。

研究区沉积微相与天然气水合物储藏分带的关系，需在以后的工作中根据岩石矿物颗粒间的胶结填充方式、元素组成等做进一步的综合分析。

5 结 论

(1)根据 DK-3 钻井岩心的粒度变化特征，将该区中侏罗统划分为 4 个变化特征不同的层段（由深到浅依次为 D、C、B、A 段），XRD 分析结果与粒度分析结果相互对应。

(2)通过对 DK-3 钻井地层特征和样品粒度、XRD 的综合分析，由 D→A 四个层段识别出 4 种沉积相类型，由深到浅分别为辫状河、湖泊、曲流河三角洲和湖泊环境。

(3)DK-3 钻井中天然气水合物主要有 2 种赋

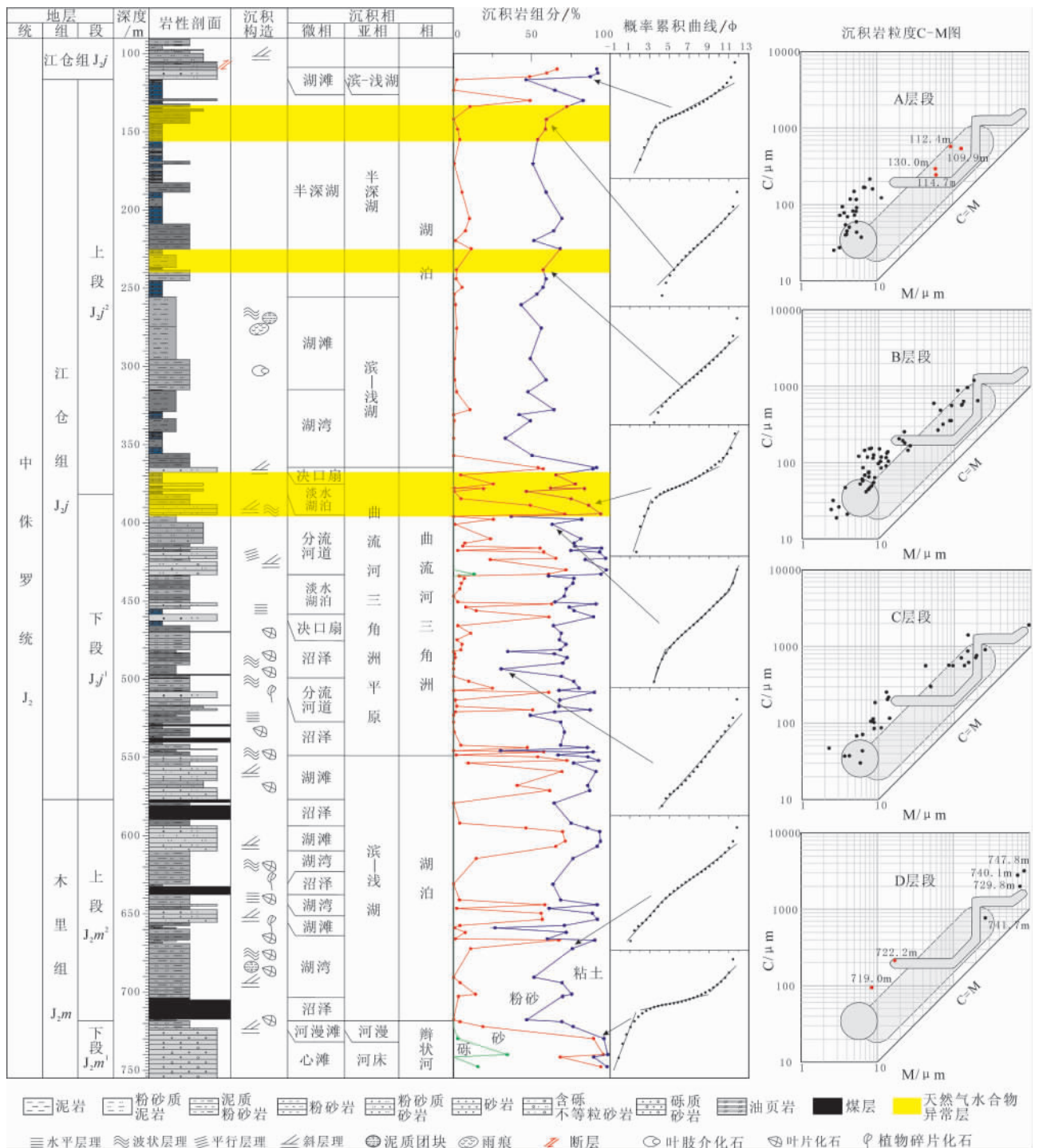


图 4 DK-3 钻井粒度概率累积曲线、C-M 图和沉积环境变化

Fig. 4 Lithology of borehole DK-3 core, grain-size, probability cumulative grain-size distribution curve, C-M diagram and changes of sedimentary environment

存形态, 133~156m 和 225.1~240m 井段的天然气水合物主要以薄层状分布于岩石裂隙断面上, 而在 367.7~396m 井段中, 天然气水合物除存在于岩石裂

隙中外, 在砂岩孔隙中亦大量存在。天然气水合物的储存在分布和产出沉积环境和构造条件有着密切的联系。

致谢: 野外工作期间得到中国地质科学院矿产

资源研究所祝有海、卢振权研究员的精心指导,并得到中国地质科学院勘探技术研究所张永勤,青海省煤炭地质 105 勘探队文怀军、贾志耀、庞建宏,北京化工大学武淑娇,吉林大学赵江鹏、李国圣等同志的大力帮助,在此一并表示诚挚的谢意。

参考文献

- [1]Kvenvolden K A. Potential effects of gas hydrate on human welfare [C]//Proceeding of National Academy of Science Colloquium. US-A, 1999, 96: 3420-3426.
- [2]Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. Marine Geology, 2000, 167: 29-42.
- [3]Diaconescu C C, Kieckhefer R M, Knapp J H. Geophysical evidence for gas hydrates in the deep water of the South Caspian Basin, Azerbaijan[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18: 209-221.
- [4]于兴河,张志杰,苏新,等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J]. 地学前缘,2004,11(1):311-315.
- [5]于兴河,张志杰. 南海北部陆坡区新近系沉积体系特征与天然气水合物分布的关系[J]. 中国地质,2005,32(3):470-476.
- [6]苏新. 海洋天然气水合物分布与“气-水-沉积物”动态体系——大洋钻探 204 航次调查初步结果的启示[J]. 中国科学(D 辑),2004,34(12):1091-1099.
- [7]苏新,陈芳,于兴河,等. 南海陆坡中新世以来沉积物特性与气体水合物分布初探[J]. 现代地质,2005,19(1):1-13.
- [8]卢振权,吴能友,陈建文,等. 试论天然气水合物成藏系统[J]. 现代地质,2008,22(3):363-375.
- [9]沙志彬,郭依群,杨木壮,等. 南海北部陆坡区沉积与天然气水合物成藏关系[J]. 海洋地质与第四纪地质,2009,29(5):89-98.
- [10]Yakusheĭ V S, Chuĭlinr E M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia[J]. Cold Regions Science and Technology, 2000, 31: 189-197.
- [11]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.
- [12]祝有海,刘亚玲,张永勤. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J]. 地质通报,2006,25(1/2):58-63.
- [13]卢振权,吴必豪,饶竹. 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[J]. 地质通报,2007,26(8):1029-1040.
- [14]Collett T S, Lee M W, Agena W F, et al. Permafrost Associated Natural Gas Hydrate Occurrences on the Alaska North Slope[J]. Marine and Petroleum Geology (2009), doi: 10.1016/j.marpetgeo. 2009.12.01.
- [15]Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [16]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.
- [17]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.
- [18]青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1991:178-180.
- [19]文怀军,鲁静,尚璐君,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.
- [20]孙崇仁,陈国隆,李璋荣,等. 青海省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997:173-189.
- [21]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.
- [22]周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社,2000:309-326.
- [23]张世涛,宋学良,张子雄,等. 星云湖表层沉积物矿物组成及其环境意义[J]. 地球科学进展,2003,18(6):928-932.
- [24]A H 布朗洛. 地球化学[M]. 北京:地质出版社,1982: 323-329.
- [25]孙永传,李蕙生. 碎屑岩沉积相和沉积环境[M]. 北京:地质出版社,1986.
- [26]伏万军. 粘土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J]. 古地理学报,2000,2(3):59-68.
- [27]汤艳杰,贾建业,谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. 地学前缘,2002,9(2):337-344.
- [28]周怀阳,叶瑛,沈忠悦. 南海南部沉积物中粘土矿物组成变化及其古沉积信息记录初探[J]. 海洋学报,2004,26(2):53-60.
- [29]管章志,师育新,戴雪荣,等. 安徽龙河口水库流域沉积物中粘土矿物分析及其环境意义[J]. 岩石矿物学杂志,2007,26(1):95-100.
- [30]罗忠,邵龙义,姚光华,等. 滇东黔西上二叠统含煤岩系泥岩粘土矿物组成及环境意义[J]. 古地理学报,2008,10(3):297-304.
- [31]赵永胜. 云南星云湖断陷湖盆中粘土矿物组合特征与沉积环境关系的初步探讨[J]. 海洋与湖沼,1993,24(5):447-455.
- [32]何良彪. 渤海表层沉积物中的粘土矿物[J]. 海洋学报,1984,6(2):237-243.
- [33]吕全荣,王效京. 长江口细粒沉积物的粘土矿物及地球化学特征[J]. 沉积学报,1985,3(4):142-151.
- [34]Passaga R. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool[J]. Sedimentary Research, 1964, 34(4): 830-847.
- [35]刘宝瑁. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社,1980.
- [36]吕志发. 粒度曲线和参数序列综合分析及其在环境分析中的应用[J]. 煤田地质与勘探,1990,(2):12-16.
- [37]Bravard J P, Peiry J L. The CM pattern as a tool for the classification of alluvial suites and floodplains along the river continuum[J]. Geological Society, London, 1999, 163: 259-268.
- [38]李双应. 山东东营博兴洼陷沙四段砂岩粒度分析与沉积环境[J]. 安徽地质,2008,18(4):258-263.
- [39]Gorman A R, Holbrook W S, Hornbach M J, et al. Migration of methane gas through the hydrate stability zone in a low-flux hydrate province[J]. Geology, 2002, 30(4): 327-330.
- [40]Tréhu A M, Bohrmann G, Rack F R, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, 204[CDROM]. College Station, Texas: Texas A & M University (Ocean Drilling Program), 2003.
- [41]Milkov A V, Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19: 1-11.
- [42]陈忠,颜文,陈木宏,等. 海底天然气水合物分解与甲烷归宿研究进展[J]. 地球科学进展,2006,21(4):394-400.
- [43]Winters W J, Dallimore S R, Collett T S, et al. Physical properties of sediments from the JA PEXö JNOCöGSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well[J]. Bulletin Geological Survey, Canada, 2002, 544: 95-100.