

贺兰拗拉谷北段奥陶系等深流沉积

海 军, 孟祥化, 葛 铭, 薛怀宇

(中国地质大学 沉积盆地研究所, 北京 100083)

摘要: 采用野外观察描述和室内分析相结合的方法, 以桌子山剖面奥陶系沉积相研究为基础, 识别出了典型的碳酸盐等深流沉积。首次采用 Fischer 图解法, 求取了碳酸盐等深流沉积其可容空间变化曲线。参照野外的样品化学分析数据, 得出深水等深岩的生烃能力较好, 故对等深岩的研究具有潜在的矿产意义。在未来研究上, 应运用地震波识别、遥感等现代科技调查手段, 进行多学科综合研究, 尽快建立一套完善的识别标志, 以促使其逐渐成为沉积学中一个更为完善的研究领域。

关键词: 等深流沉积; Fischer 图解; 沉积相; 层序

中图分类号: P512.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)01-0058-07

Ordovician Contourite of the North Part of Helan Aulacogen

DING Hai-jun, MENG Xiang-hua, GE Ming, XUE Huai-yu

(Institute of Sedimentary Basin, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract Representative carbonate contourite is discovered based on field outcrop descriptions and laboratory analysis based on detailed study of Zhuozishan section. This paper gets the portion of the carbonate contourite with hypothetical Fischer diagram showing changes in accommodation space as a function of cycle number. Using the chemical data of field samples it is found that the carbonate contourite in deep sea may yield hydrocarbon effectively. It is significant to find potential mineral from contourite study. In the future, we should synthesize multidisciplinary approaches such as identification of seismic wave and remote sensing etc. and establish some effective discriminating indicators so as to advance the research ulteriorly and make it a more perfect research field in the marine sedimentology.

Key words: contourite; Fischer diagram; sedimentary facies; stratigraphic sequence

0 引言

Heezen^[1] 等在对北大西洋陆隆水动力条件和沉积物进行观察和研究之后, 首先提出了等深流这一术语。他们认为等深流是由于地球旋转的结果而形成的温盐环流, 它平行海底等深线作稳定低速流动, 主要出现在陆隆区。随着深海调查技术的进步和完善, 特别是深海钻探计划和大洋钻探计划的实施, 不仅证实了深海等深流活动和等深流沉积的存在, 而且还发现了大量由等深流沉积组成的巨大沉积体, 其中最典型的就是等深岩丘。1993 年 Faugeres 和 Stow 详细介绍了这一时期所取得的主

要成果^[2-6]。此后高振中等对等深流及其沉积作用作了系统地论述^[7-11]。中国等深流沉积研究起步较晚, 主要开始于 20 世纪 80 年代初期, 中国沉积学者对古代等深流沉积进行了研究, 并取得了可喜的成果, 得到国外同行的密切关注, 特别是段太忠等对湖南桃园九溪下奥陶统碳酸盐等深岩丘的研究^[12] 以及高振中等对鄂尔多斯台地西缘甘肃平凉中奥陶统等深岩丘的研究^[7]。由于等深岩丘的识别标志很难被发现, 全世界等深岩丘仅发现 3 例碳酸盐岩岩丘, 中国就占 2 例^[13]。迄今为止, 没有碎屑岩等深岩沉积的报道。笔者根据国内外已有成果, 对等深流沉积的特征进行初步归纳总结, 并注

收稿日期: 2008-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40172043)

作者简介: 丁海军 (1978-) 男, 山东菏泽人, 工程师, 理学博士研究生, 从事沉积盆地研究, E-mail: dhjxhb@yahoo.cn

重与其他深水沉积的一系列对比、区分。根据古水流方向、古构造、古地理和粒度分析等资料对桌子山剖面奥陶系克里摩里组做出其系碳酸盐岩等深岩的判定。参照野外样品分析数据, 得出深水等深岩的生烃能力较好, 故对等深岩的研究具有潜在的矿产意义。

1 等深流发育环境

深水环境一方面受制于多种作用机制, 如重力、多种底流、大洋涡流、水下峡谷中往来的潮汐底流、各种内波、上升流和下降流等; 同时深水又具有活跃的构造活动, 体现为各种底辟活动、高热流值; 且深水陆坡恰处于坚硬的大陆克拉通和大洋地壳之间, 是对各种构造活动响应最为敏感的地理位置。因此通常由陆坡(又可划分为上中下几段)、陆隆和深海平原等地貌单元组成的深水环境具有极为复杂的地貌特征, 如滑坡坎壁、峡谷底床、谷壁、水道和堤坝、台地、多种形状的扇体、多类型的等深流沉积等。图1是深水环境沉积模式图, 揭示了油流和等深流互动所形成的复杂地貌。

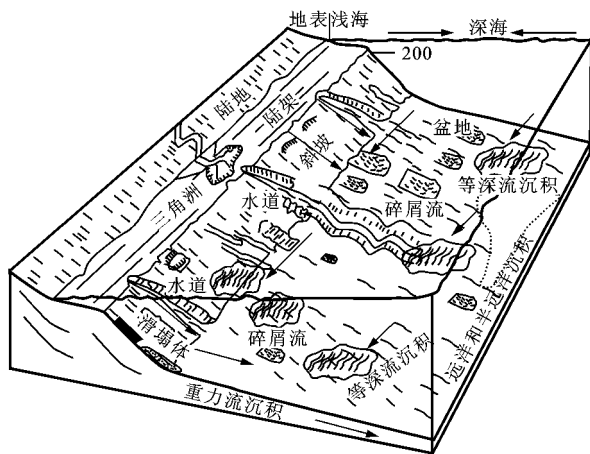


图1 深水环境沉积模式

Fig. 1 Sedimentation Model of Deep Water

等深流沉积粒度很细, 以粉砂、泥质为主, 砂、砾很少, 且单层厚度一般不超过5 cm。这主要是因为等深流流速低, 仅为5~20 cm/s。但是, 随着流速的增加, 可以沉积较粗粒的等深岩, 单层厚大于0.5 m, 有的达1.5 m。近年来的深海调查发现, 在北大西洋东部的加底斯湾, 靠近直布罗陀海峡的上部大陆坡地区, 底流速度达180~250 cm/s, 向西北方向等深流流速逐步减为75~40 cm/s^[14]。这种高流速的等深流沉积了砂质等深岩和细砾质等深

岩。等深流是平行海底等深线流动的, 因此等深岩中一般具有平行于斜坡走向的流向标志, 小型沙纹层理中的细层倾向一般是与斜坡走向平行的。等深流流动强度呈周期性变化, 等深岩一般具有独特的等深岩层序, 垂向上呈细—粗—细的逆—正递变。

2 桌子山奥陶系克里摩里组沉积

研究区位于乌海市海南区, 是贺兰拗拉谷北段奥陶系层序地层研究的典型剖面。桌子山奥陶系包括三道坎组、桌子山组、克里摩里组、乌拉力克组、拉什仲组、公乌素组、蛇山组, 其中克里摩里组沉积环境有别于其他各组, 沉积体主要为暗色薄层状泥灰岩, 其间夹有黑色页岩, 水平纹理发育, 含浮游有孔虫、笔石、三叶虫、小腕足属, 属于广海陆棚相, 这些生物化石组合特征表明研究区当时应为深水沉积环境。

克里摩里组沉积无论是在产状、物质成分、结构还是在沉积构造上均具有其自身的特征。

2.1 产状

该产状多呈不规则薄层状、透镜状或厚层状产出。单层厚为一至数十厘米。顶底面接触界线渐变或突变, 有时呈规模巨大的席状分布。

2.2 成分

该产状为灰色纯净的砂屑泥晶灰岩, 单层厚为8~15 cm, 最大不超过20 cm。以夹层形式出现于黑色纹层状含泥含碳细粉屑泥晶灰岩中, 夹层顶、底界线清晰。镜下薄片观察表明, 每个单层内由两种岩性交替组成: 细粉屑泥晶灰岩和砂屑泥晶灰岩, 其厚度为3~20 cm, 相互间以突变、平坦或侵蚀的界面相接触。在每个层中, 均广泛发育微型的侵蚀面和垂向上具有粒度递变的特征。细粉屑泥晶灰岩单层厚3~10 mm, 粉屑颗粒质量分数为25%~45%, 颗粒粒径一般为25~35 μm , 较粗粒的粉屑很少, 灰泥组分质量分数为60%~90%, 大多已重结晶。这两种组分以不均一的比例组合, 常呈极薄的扁豆状或条带状。砂屑泥晶灰岩单层厚8~20 mm, 颗粒质量分数为35%~50%, 粒径以45~70 μm 占优, 最大达110 μm ; 颗粒间由已重结晶的灰泥充填, 与沉积期后的亮晶胶结物有明显区别, 其质量分数为50%~70%。颗粒常呈不规则状富集, 不含陆源泥及砂质, 见少量生物碎屑。另外, 在该相中还发育极小型的交错层理, 纹理由较粗的

钙屑颗粒定向组成。

2.3 结构

沉积粒度主要为泥晶级和细粉砂级,砂级次之,偶见细砂级。颗粒分选性一般中等—较好,局部极好。其标准偏差 0.1,一般小于 0.8 (Folk 值)^[15]。在正态概率曲线上,一般有 2~3 个沉积总体,其中跳跃总体斜率大。

2.4 原生沉积构造

沉积构造十分发育,其原生沉积构造包括机械成因(层理、侵蚀构造和定向构造等)和生物成因(生物扰动构造和遗迹化石)。常见的层理有小型交错纹理和水平纹理,有时可见大型纵向交错层和黏性交错层。侵蚀构造的发育是克里摩里组沉积的重要特征,侵蚀构造有侵蚀面、槽模。定向构造主要由生物屑和碎屑颗粒的定向排列表现出来,如长形颗粒平行于斜坡走向的定向排列,生物成因构造是生物扰动构造,生物扰动几乎贯穿所有克里摩里组沉积物中,使得原始层理构造部分或完全遭到破坏。

2.5 垂向沉积层序

Gonthier 等^[16]在研究北大西洋东缘现代等深岩丘时,发现等深流沉积的垂向组合具有一定的规律性,即按一定的垂向顺序排列,他们首先使用了“层序”一词来描述,并确定了其典型模式。该模式的特征是具有一个向上变粗的逆递变段和一个向上变细的正递变段构成的对称递变层序,其厚度为 10~100 cm。层序各段间的接触关系有过渡的、突变的和侵蚀的,这种递变层序的厚度和完整性变化很大,既可以是对称的,也可以是不对称的。克里摩里组沉积垂向上呈细—粗—细的逆—正递变(图 2)。克里摩里组沉积层序在剖面上对称排列构

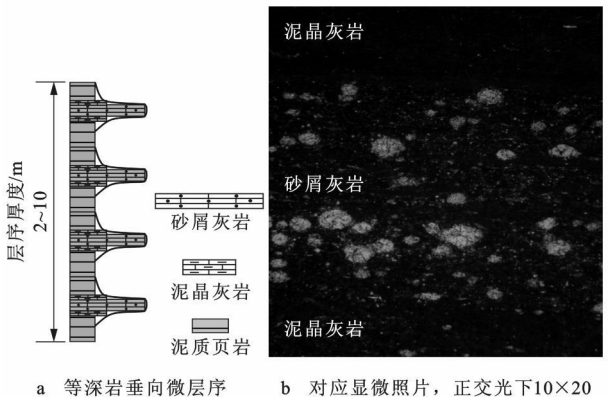


图 2 桌子山灰岩等深岩垂向细—粗—细层序

Fig. 2 Vertical Sequence of Contourite Drift in Zhuozi Mountain Section

成,自下而上分别是:①细粉屑泥晶灰岩;②砂屑泥晶灰岩;③细粉屑泥晶灰岩。这种层序反映等深流活动由弱至强再变弱的周期性变化。上述特征表明它们与深水盆地沉积的泥晶灰岩不同,应属等深流沉积。

2.6 克里摩里组等深岩与海平面的关系

等深流沉积的发育情况与海平面变化具有内在联系,海平面的升降对深水作用机制有着重大影响,在高纬度的冰川大陆边缘(如欧洲西北部),大陆冰川在冰期向海推进,深水环境以重力(流)作用为主;反之,在间冰期,海平面相对上升,重力(流)地位下降,等深流的地位相对突出。等深流沉积可作为海侵体系域较特征的沉积类型。

笔者首次应用 Fischer 图解研究等深岩, Fischer 图解一般适用于沉积时没有长时间的水深变化(即发育补偿性沉积作用地区)^[17-21]。在绘制 Fischer 图解时,纵坐标为平均厚度累积偏移,横坐标为旋回数。笔者将研究区目的层段的剖面划分出 62 个旋回小层序,并根据孔隙度、深度关系对各旋回小层序厚度进行压实校正,获得各小层序原始厚度。各小层序的原始厚度计算有一个基本假设,即沉积物在压实过程中,其固体颗粒不可压缩,也不与外界有物质交换。造成沉积物孔隙度和厚度减小的原因是孔隙中的流体不断被排出。

从 Fischer 图解曲线(图 3)可以明显看出,研究区克里摩里组自底至顶基本上可分为 4 个完整且规模较大的实际可容空间旋回,是 4 次显著的海平面上升下降旋回(即水进水退旋回)。结合其他地质资料,可将其定为 4 个层序单元,其跨时均为 1 Ma 以上,相当于 Vail 等所定义的三级旋回层序单元。从图中还可以看出,研究区克里摩里组可进一步划分为 19 个次级旋回,跨时 20×10^4 a 左右,介

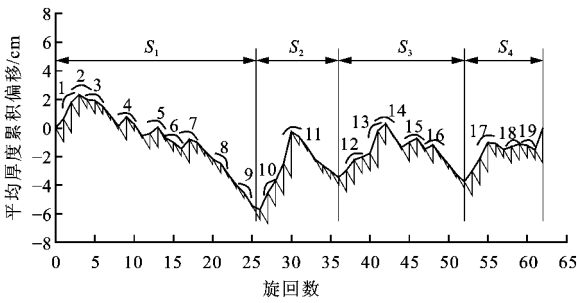


图 3 桌子山剖面奥陶系克里摩里组 Fischer 图解

Fig. 3 Fischer Diagram of Kelimoli Formation in Ordovician System of Zhuozi Mountain Section

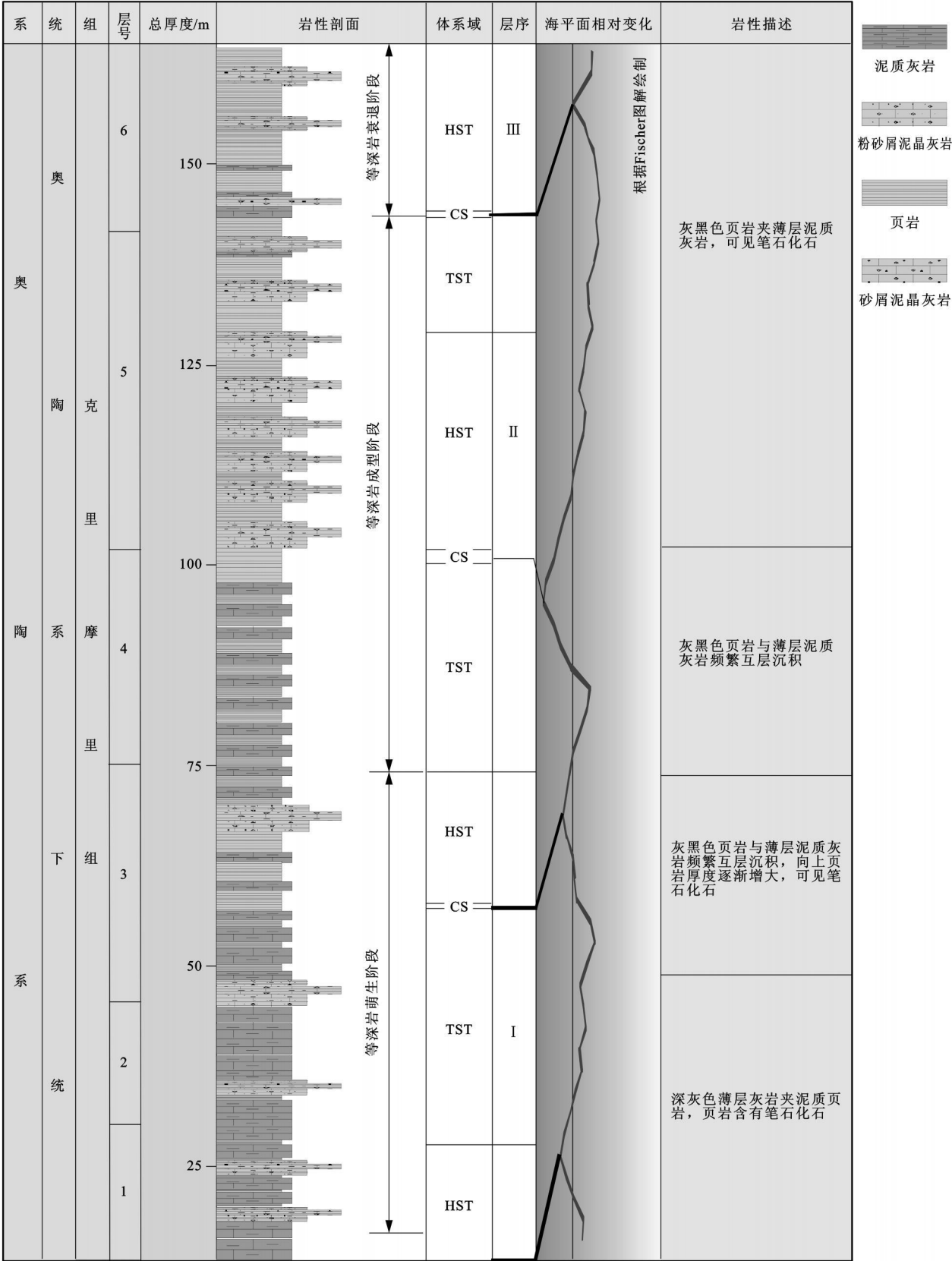


图 4 桌子山剖面奥陶系克里摩里组柱状图

Fig. 4 Histogram of Kelimoli Formation in Ordovician System of Zhuozi Mountain Section

于米兰柯维奇天文旋回的偏心率周期($10 \times 10^4 \sim 40 \times 10^4$ a)之间,与天文驱动的古气候变迁所引起的海平面高频振荡有关,可定为相当于 Vail 等所定义的四级旋回层序单元小层序组。根据实际资料分析研究,在研究区的目的层段中,可识别出 19 个小层序组,4 个三级旋回层序单元。

根据海平面(图 4)的变化情况,可将克里摩里组等深岩的发育分为 3 个阶段:

(1)萌生阶段。研究表明,早奥陶世晚期至中奥陶世早期,本区原地深水沉积和重力流沉积相当发育。在克里摩里组下部已开始发育一些特征明显的等深岩,到克里摩里组中部,等深岩数量明显增多,灰岩等深岩大量产出。因此,克里摩里组等深岩约萌生于克里摩里组下部沉积时期。

(2)成型阶段。克里摩里组中部和上部等深岩数量大,特别是上部,单层厚可达 0.2 m,并可与泥质页岩相互叠置成厚 1 m 的连续分布段。因此,克里摩里组中、上部沉积时期应为其等深岩的主要形成时期。

(3)衰退阶段。根据区域地层对比,结合区域上中奥陶世末期本区裂谷有闭合的趋势的古地理特点,推测等深流沉积的衰退期应为中奥陶世末期至晚奥陶世早期。

2.7 克里摩里组等深岩的古水流方向和物源

Heezen 等^[1]认为等深流是由于地球旋转的结果而形成的环流,这种底流平行海底等深线作稳定低速流动($5 \sim 20$ cm/s),主要出现在陆隆区,其物质来源通常包括以下几种:

- (1)由海底火山喷发所形成的火山灰。
- (2)由浊流带来的陆棚碎屑物。
- (3)冰川溶化的碎屑物。
- (4)生物屑及生物成因的硅质岩。
- (5)海底沉积物的重新悬浮。

根据剖面上等深岩的物质组分特征可排除由(1)、(3)、(4)种物源的可能性。在桌子山地区剖面中,见有大量的重力流沉积,但粒度较粗,具明显的正递变。因此,可推断出桌子山地区等深岩的物质来自于浊流沉积,是浊流远端或未稍的细粒物质受等深流体的搬运、改造和沉积的结果。

通过对桌子山地区每条剖面等深岩中沙纹层理层倾向以及少数砂屑灰岩中冲蚀模构造的实际测量,并经吴氏网校正,得知等深流古流向为北西方向,而桌子山一带的重力流方向为南西方向

(图 5)。

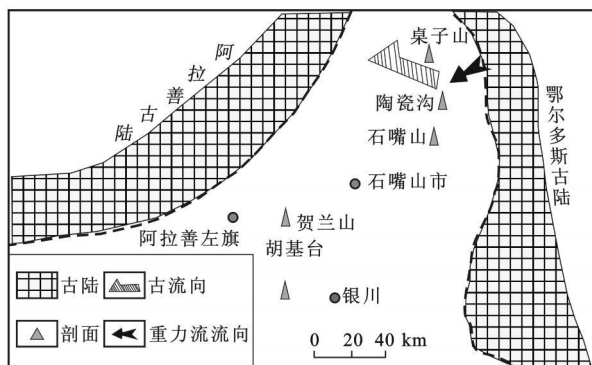


图 5 奥陶系等深岩古流向与重力流流向对比

Fig. 5 Comparison of the Flow Direction Between the Contourite and Gravity Current in Ordovician System

根据野外露头资料和等厚图,做出了奥陶系克里摩里组岩相古地理图(图 6)。从图 6 可以看出,克里摩里组时期,桌子山主要为含泥灰岩相沉积。根据图 5、6 的古流向图可以得出等深流具有双向流动性。

3 等深岩生油潜力评价

从野外样品的有机质丰度看,以盆地—盆地边缘相的暗色细粉屑泥晶灰岩较好,贺兰拗拉谷奥陶系等深岩有机碳的平均值接近 0.607 0%,远远高于中国其他地区海相地层(有机碳质量分数一般小于 0.20%,每吨岩石的生烃潜力不足 0.2 kg)^[23]。从砂屑泥晶灰岩到细粉屑泥晶灰岩,有机碳含量有随泥质含量增加而增高的趋势,这是因为泥质对水体中的悬浮有机物具较强吸附作用的结果。泥与有机物一并沉积后,泥质物颗粒细小、致密,能隔绝水体,免使有机质受溶解氧的氧化和生物的降解,使有机质得以保存。它们可达到较好生油岩的标准,应属较好生油岩。目前已发现的几个等深流岩丘表明,它们与油气紧密相连。如 Bein 和 Weiler 在以色列及其邻国白垩系塔勒梅亚费组发现的灰质等深流沉积物,长至少 150 km,宽约 20 km,厚度超过 3 km,是良好的油气储集层^[23]。随着研究工作的不断深入,等深流沉积与油气的关系将会被揭示出来,中国油气勘探必将会出现一个新的天地。

4 结语

(1)克里摩里组等深岩无论是在产状、物质成分、结构,还是在沉积构造上均具有其自身的特征,

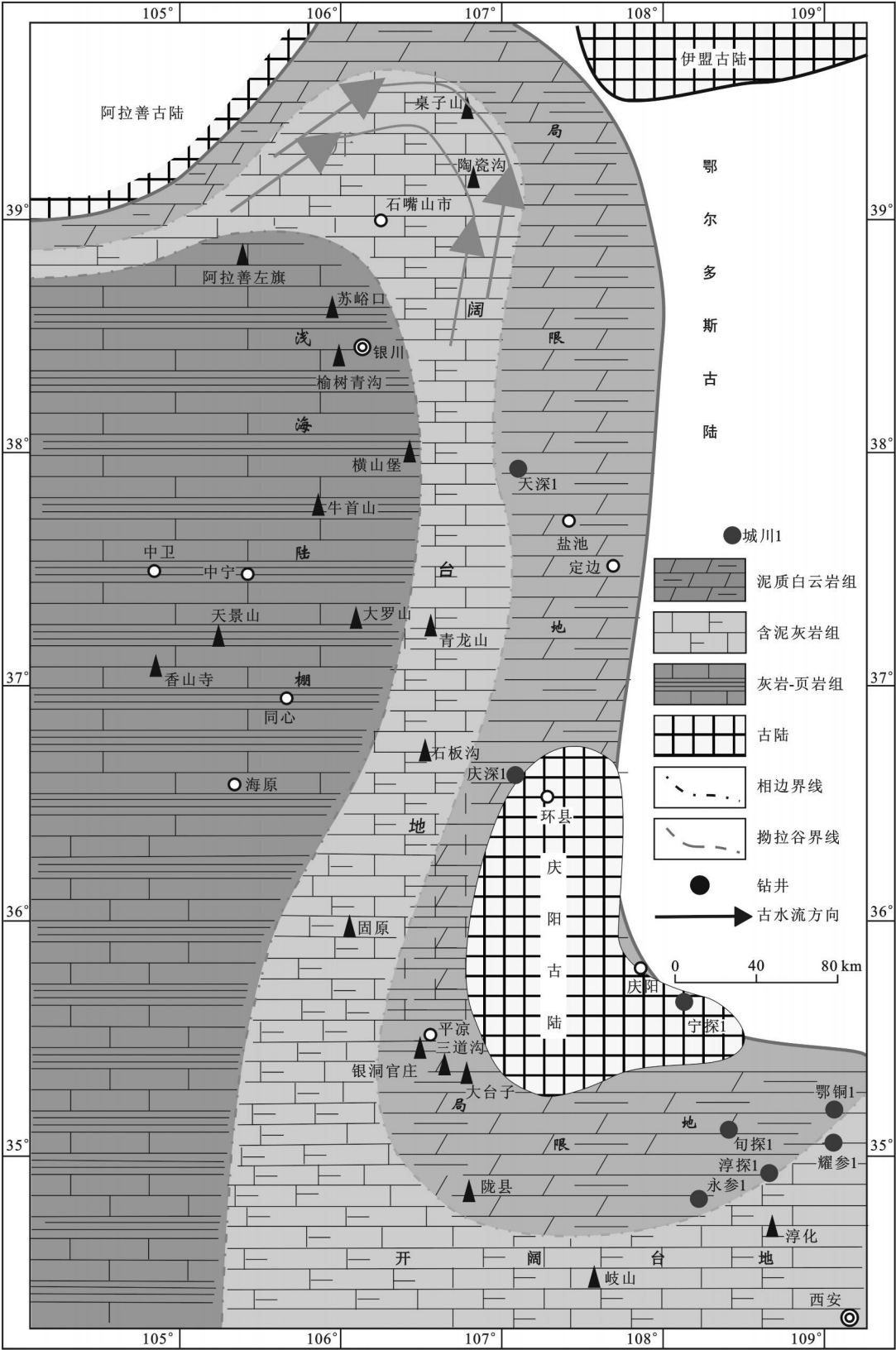


图 6 桌子山剖面奥陶系克里摩里组岩相古地理
Fig. 6 Lithofacies-Palaeogeographic Map of Kilimoli Formation in Ordovician
System of Zhuosi Mountain Section

均符合等深岩的典型特征。

(2)等深岩沉积的发育情况与海平面变化具有内在联系。

(3)用 Fischer 图解研究等深岩是切实可行的方法。

(4)贺兰拗拉谷奥陶系等深岩可作为有效的烃源岩。

野外曾得到宁夏地矿局郑昭昌、潘行适总工及长庆油田 左智峰工程师等的指导,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] Heezen B C, Hollister C D. The Face of the Deep[M] . Oxford: Oxford University Press, 1971.
- [2] Faugeres J C, Stow D A V. Bottom-current-controlled Sedimentation; a Synthesis of the Contourite Problem[J] . Sedimentary Geology, 1993, 82(1/4): 287-290.
- [3] Stow D A V. Distinguishing Between Fine-grained Turbidites and Contourites on the Nova Scotian Deep Water Margin[J] . Sedimentology, 2006, 26(3): 371-387.
- [4] Stow D A W, Piper D J W. Deep-water Fine-grained Sediments; Facies Models[J] . Geo Soc London Spec Pub, 1984, 15: 611-645.
- [5] Stow D A V. Deep Sea Processes of Sediment Transport and Deposition[C] //Pye K. Sediment Transport and Depositional Processes. London: Blackwell Sci Pub, 1994: 257-291.
- [6] Faugeres J C, Mezemaïs M L, Stow D A V. Contourite Drift Types and Their Distribution in the North and South Atlantic Ocean Basins[J] . Sedimentary Geology, 1993, 82(1/4): 189-203.
- [7] 高振中, 何幼斌, 罗顺社, 等. 深水牵引流沉积—内潮汐、内波和等深流沉积研究[M] . 北京: 科学出版社, 1996.
- [8] 张兴阳, 高振中, 姚雪根. 北大西洋洛克尔海槽东北部内波沉积——深水大型沉积物波成因的再解释[J] . 沉积学报, 1999, 17(3): 464-472.
- [9] 高振中, 何幼斌, 李建明, 等. 我国发现内潮汐沉积[J] . 科学通报, 1997, 42(13): 1418-1421.
- [10] 高振中, Eriksson K A. 美国阿巴拉契亚山脉芬卡苏地区奥陶纪海底水道中的内潮汐沉积[J] . 沉积学报, 1993, 11(1): 12-22.
- [11] Gao Z Z, Eriksson K A. Internal-tide Deposits in an Ordovician Submarine Channel: Previously Unrecognized Facies? [J] . Geology, 1991, 19(7): 734-737.
- [12] 段太忠, 郭建华, 高振中, 等. 华南古大陆边缘湘北九溪下奥陶统碳酸盐等深岩丘[J] . 地质学报, 1990, 64(2): 131-143.
- [13] 许文彬, 徐茂泉, 孙美琴, 等. 深流沉积研究现状与展望[J] . 台湾海峡, 2004, 23(3): 45-52.
- [14] Nelson C H, Baraza J, Maldonado A. Mediterranean Undercurrent Sandy Contourites, Gulf of Cadiz Spain[J] . Sedimentary Geology, 1993, 82(1/4): 103-131.
- [15] Folk R, Moser G. Tricritical Dynamics at the Demixing- λ -Transition in ^3He - ^4He Mixtures[J] . Journal of Low Temperature Physics, 2008, 150(5/6): 689-709.
- [16] Gonthier E G, Faugeres J C, Stow D A V. Contourite Facies of the Faro Drift, Gulf of Cadiz[C] //Stow D A V, Piper D J W. Fine-grained Sediments; Deep-Water Processes and Facies. London: Blackwell Scientific Publications, 1984: 275-292.
- [17] Hotchkiss F S, Wunsch C. Internal Waves in Hudson Canyon with Possible Geological Implications [J] . Deep-sea Research, 1982, 29(4): 415-442.
- [18] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variation in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages[J] . Science, 1976, 194: 1121-1132.
- [19] Dickson R, Kidd R B. Circulation in the Southern Rockall Trough the Oceanographic Setting of Site[J] . Sedimentary Geology, 1982, 71(7): 126-132.
- [20] Grotzinger J P. Cyclicity and Paleoenvironmental Dynamics, Rocknest Platform, Northwest Canada[J] . Geological Society of America, 1986, 97(10): 1208-1231.
- [21] Hardie L A, Dunn P A, Goldhammer R K. Field and Modeling Studies of Cambrian Carbonate Cycles, Virginia Appalachians: Discussion[J] . Journal of Sedimentary Research, 1991, 61(4): 636-646.
- [22] 夏新宇, 洪峰, 赵林, 等. 烃源岩生烃潜力的恢复探讨——以鄂尔多斯盆地奥陶统碳酸盐岩为例[J] . 石油与天然气地质, 1998, 19(4): 307-312.
- [23] Bein A, Weiler Y. The Cretaceous Talme Yafe Formation: a Contour Current Shaped Sedimentary Prism of Calcareous Detritus at the Continental Margin of the Arabian Craton [J] . Sedimentology, 2006, 23(4): 511-532.