

湘北九溪、沅古坪下奥陶统等深岩类型、碳氧同位素特征及沉积环境

罗顺社^{1,2},吕奇奇^{1,2},席明利^{1,3},何幼斌¹,向吉¹

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 武汉 430100;

2. 长江大学 地球科学学院,湖北 武汉 430100;3. 中国石油 长庆油田分公司 第十一采油厂,甘肃 庆阳 745600)

摘要:深水环境下等深流沉积研究已经开展50多年,在这50多年里虽然取得了一些成果,但对等深岩的形成机理和沉积环境研究较少。通过野外剖面实测、详细描述和碳氧同位素特征分析,对研究区形成等深岩的环流的特征及不同类型等深岩的形成环境进行了探索。根据其岩性特征,研究区下奥陶统盘家咀组发育有灰泥等深岩、粉屑等深岩、砂屑等深岩、砾屑等深岩和生物屑等深岩5种等深岩相,在垂向上主要发育由单一灰泥等深岩叠置组成的层序、灰泥等深岩与生物屑等深岩组成的层序和灰泥等深岩与砂屑等深岩组成的层序3种不完整等深岩层序和少量的完整等深岩层序。为了研究该等深流沉积形成时的古环境,分别对研究区不同类型等深岩与原地沉积进行系统采样做碳、氧同位素分析。研究表明,工区下奥陶统盘家咀组等深岩的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布于0.18‰~2.31‰,氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值的范围为-10.93‰~-9.54‰,盐度指数 Z 值介于122.91~127.14,温度 T 值为16.98~24.81℃。与原地沉积相比,研究区等深岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 Z 值、 T 值均较高,且随着等深岩的粒度增大,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 Z 值、 T 值均逐渐增高。这表明等深流沉积环境与原地沉积完全不同,等深岩主要形成于高盐度的较深水环境中,且盐度、水温越高,越有助于高能等深流沉积物砂屑等深岩和生物屑等深岩的形成。等深岩层序的形成周期均表现为古盐度、古水温、海平面先增大后减小的周期性变化。

关键词:碳、氧同位素;等深岩;盘家咀组;下奥陶统;中扬子台地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Types, carbon/oxygen isotope characteristics and depositional environments of the Lower Ordovician contourites in Jiuxi and Yuanguping of North Hunan Province, China

Luo Shunshe^{1,2}, Lyu Qiqi^{1,2}, Xi Mingli^{1,3}, He Youbin¹, Xiang Ji¹

(1. Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Ministry of Education,

Wuhan, Hubei 430100, China; 2. School of Geosciences of Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

3. No. 11 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang, Gansu 745600, China)

Abstract: The literature on deep-water contourites is extensive after more than 50 years of research. However, many unknowns exist in terms of their forming mechanism and sedimentary settings. The article explores the characteristics of circulation and environment for forming various contourites in the Panjiazui Formation of the Lower Ordovician in the study area based on field measured section, detailed description and analyses of carbon and oxygen isotope characteristics. Lithologic analyses show that the formation contains 5 kinds of contourite lithofacies: calcarenite, calcilutite, calcilutite, gravel and bioclastic contourites. Vertically, three types of incomplete vertical contourite sequences and some complete contourite sequences are recognized. The incomplete sequences include superimposed single calcarenite contourite sequence, interbedding calcarenite contourites and bioclastics contourite sequence and interbedding calcarenite contourites and calcilutite contourites sequence. Systematically sampling and carbon/oxygen isotope analyses of the various contourites and autochthonous deposits indicate $\delta^{13}\text{C}$ values varying between 0.18‰ and 2.31‰, $\delta^{18}\text{O}$ values changing from -10.93‰ to -9.54‰, salinity index Z shifting from 122.91 to 127.14, and temperature (T) ranging between

收稿日期:2015-01-02;修订日期:2015-08-20。

第一作者简介:罗顺社(1961—),男,博士、教授,沉积学。E-mail: lss@yangtzeu.edu.cn。

通讯作者简介:吕奇奇(1986—),男,硕士、助教,沉积储层学。E-mail: luqiqiabed@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41172105)。

16.98 and 24.81 °C. Compared with the autochthonous deposits, the contourites in the formation have higher values of $\delta^{13}\text{C}$, Z and T . With the grain size of the rock getting bigger, these values continue to increase, showing that the sedimentary environment of contourites is totally different from that of the autochthonous deposits. The contourites were mainly formed in relative deep water environment with high salinity, and higher salinity and temperature were more favorable for the formation of certain high-energy contourites, such as calcilutite and bioclastic contourites. The forming periods of contourite are all characterized by the periodical changes of first increasing and then decreasing palaeo-salinity, palaeo-temperature, and sea level.

Key words: carbon/oxygen isotope, contourite, Panjiaju Formation, Lower Ordovician, Mid-Yangtze platform

自20世纪60年代以来,等深流沉积逐渐成为沉积学的一个热点研究领域。近年来,随着深海调查设备和技术的进步,以及深海钻探计划(DSDP)(1968—1983年)、大洋钻探计划(ODP)(1985—2003年)和综合大洋钻探计划(2003年启动至今)的成功实施^[1],人们在深海发现了大量的现代等深流沉积,对现代海洋中等深流沉积也有了更深入的认识。截至目前,国内外沉积学家不仅对现代海洋中发现的大量等深流沉积做了详细的研究,而且还对地层记录中的古代等深流沉积进行了基础研究,等深岩丘的发现便是该领域最具特色的成果之一。其中,我国学者对地层记录中的等深流沉积做了较多的研究工作,目前已在湖南、湖北、甘肃、内蒙古、广西、安徽、浙江等地的不同时代地层中发现了等深流沉积^[2-7]。特别是在对地层记录中的等深岩丘的研究方面,我国学者发现了两例等深岩丘,作出了较大贡献。但是在世界范围内,古代地层记录中的等深岩丘仅有3例,分别是阿拉伯克拉通大陆边缘上的白垩系等深岩丘、中国湖南九溪下奥陶统等深岩丘和中国甘肃平凉中奥陶统等深岩丘^[5,7-8]。

由此可见,现代等深流沉积和古代等深流沉积在一定程度上存在着发展不平衡,造成这种情况的主要原因是等深流沉积的鉴别标志尚不完善、对古代等

深岩丘的形成机理和沉积环境研究较少。为了解决这些问题,本文计划通过对中扬子台地南侧下奥陶统等深岩的碳、氧同位素分析,来解决两个问题:①形成等深岩的环流的特征;②不同类型等深岩的形成环境。从而为完善等深流的鉴别标志及形成机理研究打好坚实的基础。

1 地质概况

奥陶纪时期,中扬子台地南侧的古地理环境由西北向东南依次表现为扬子地台、江南斜坡和江南盆地(图1)。台地区以一套比较纯的颗粒碳酸盐沉积为主;斜坡区以碳酸盐岩与细碎屑的混合沉积为主;盆地为一套细碎屑岩沉积^[9]。湘北九溪、沅古坪地区主要位于深水斜坡带,该区奥陶系地层自下而上依次发育盘家咀组、马刀垭组、桃花石组、九溪组、舍人湾组、宝塔组、临湘组和五峰组地层。本文研究层位为下奥陶统盘家咀组。盘家咀组为一套以灰色泥晶灰岩、砂屑灰岩和生物屑灰岩为主的沉积,主要发育垂向降落沉积、重力流沉积和等深流沉积3种沉积类型。本次实测剖面为沅古坪地区盘家咀组下部地层(图2)及九溪地区盘家咀组中上部地层(图3)。

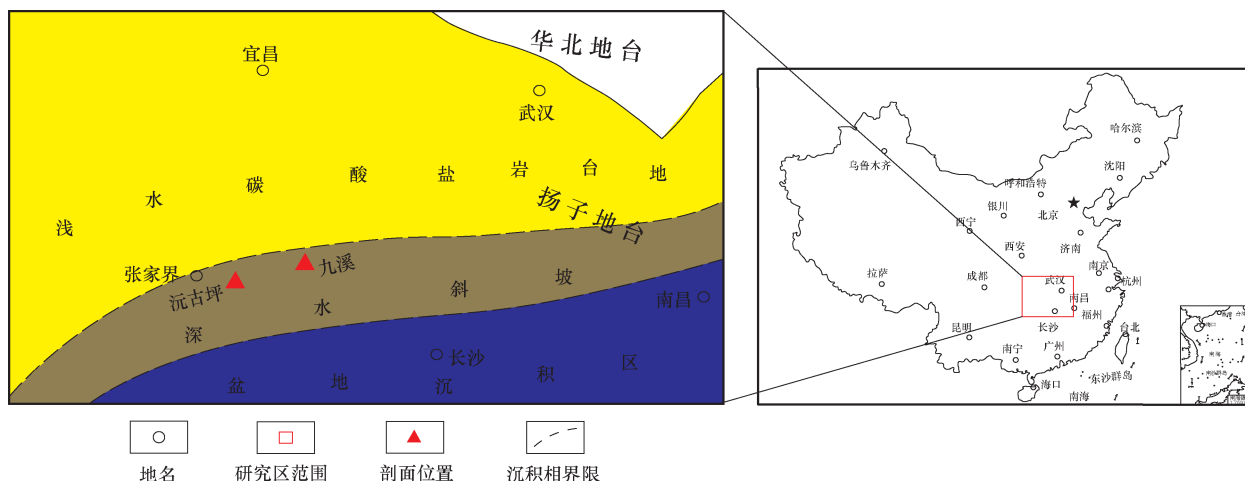


图1 研究区下奥陶统岩相古地理及剖面位置

Fig. 1 Lithofacies palaeogeography map and the section location of the Lower Ordovician in the study area

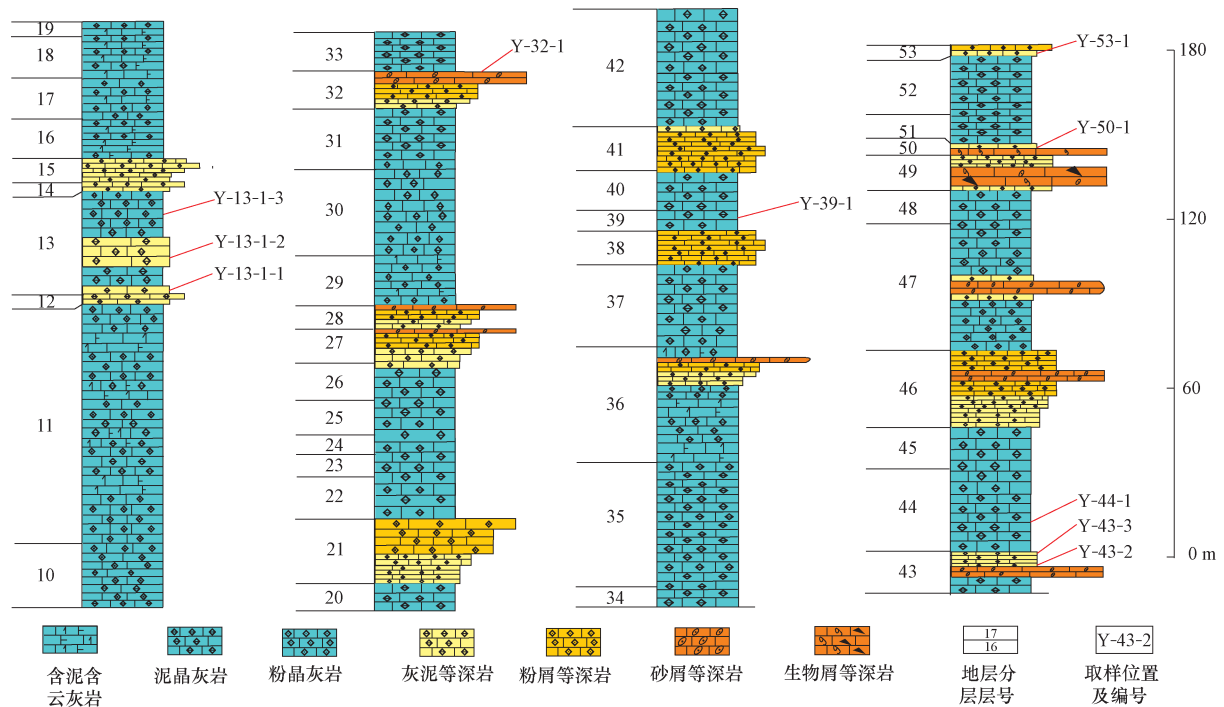


图2 沅古坪地区盘家咀组下部地层岩性剖面

Fig. 2 Lithologic section of the lower Panjiaju Formation, Yuanguping area

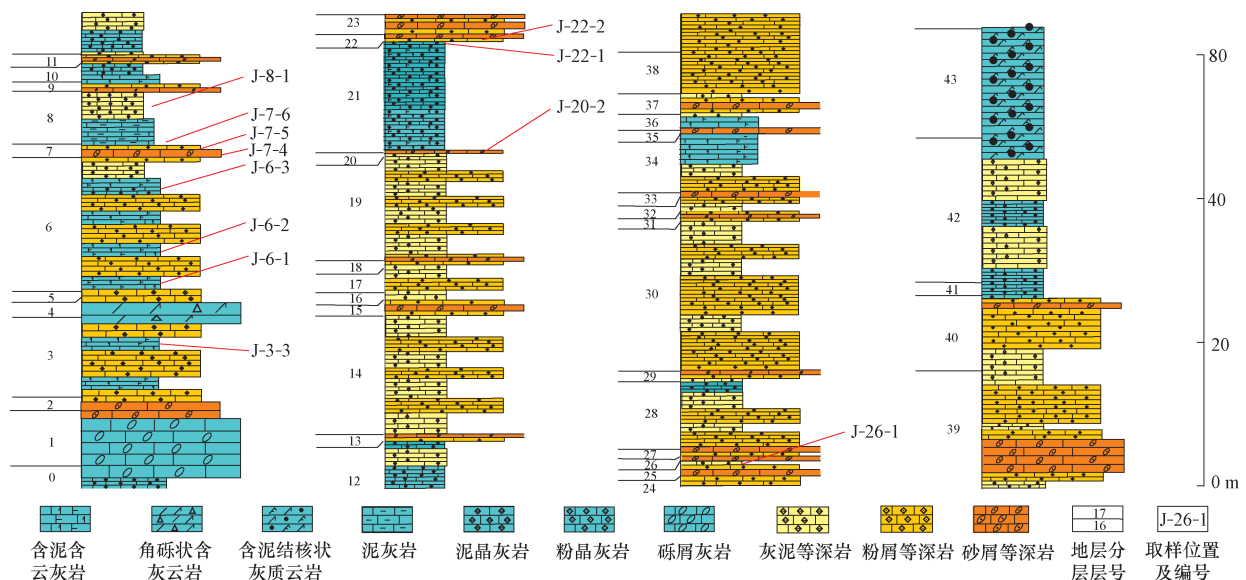


图3 九溪地区盘家咀组中上部地层岩性剖面

Fig. 3 Lithologic section of the middle-upper intervals of the Panjiaju Formation, Jiuxi area

2 等深岩类型及特征

按粒度和成分特征,可将研究区碳酸盐岩类的等深流沉积进一步细分为灰泥等深岩、粉屑等深岩、砂屑等深岩、砾屑等深岩和生物屑等深岩5种。其中砾屑等深岩在研究区较为少见。

2.1 灰泥等深岩

灰泥等深岩在研究区广泛发育;岩石类型以泥晶(含泥)灰岩为主,但常含有数量不等的粉屑、粉砂质

陆源碎屑和生物屑等颗粒,或者经常出现粉屑、石英粉砂质薄层或纹层。所见粉砂或粉屑质薄层一般厚1~3 mm,侧向延伸不稳定,生物潜穴或搅动构造大量发育(图4a)。灰泥等深岩镜下特征(图4b):粉屑(粉砂)组分30%左右,生物屑2%~20%,多为较完整的三叶虫屑,泥质3%~30%,灰泥45%~65%,可见明显的生物钻孔现象。

2.2 粉屑等深岩

粉屑等深岩由粉屑灰岩与泥晶灰岩以厘米级薄层交替构成。这种互层极不规则,彼此间界面清楚至很

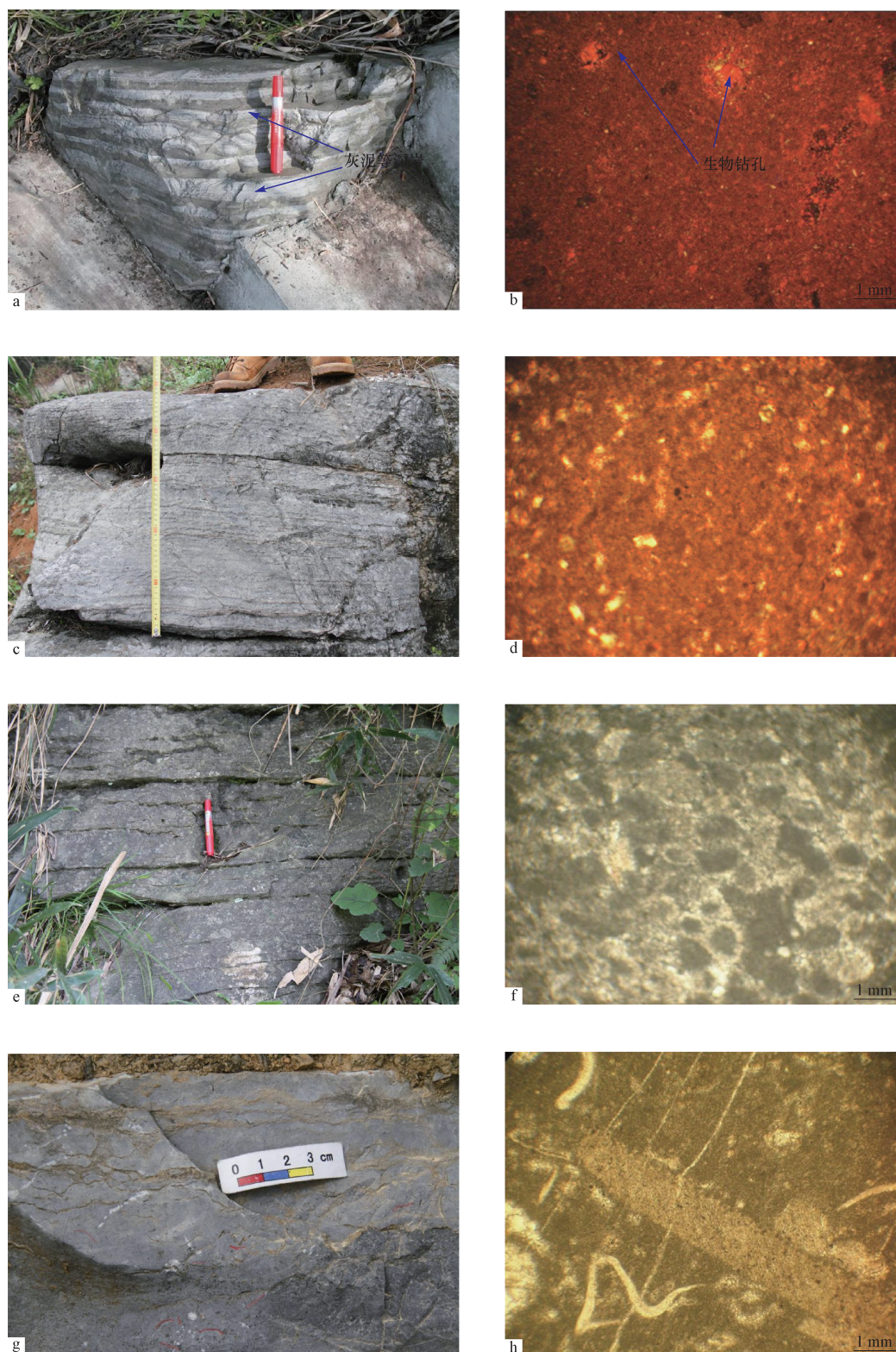


图4 研究区盘家咀组等深岩类型的野外照片及解释

Fig. 4 Outcrop photographs and interpretations showing the contourite types of the Panjiazui Formation in the study area

- a. 浅灰色泥晶灰岩(灰泥等深岩), 盘家咀组, 第2层, 沅古坪剖面; b. 泥晶灰岩, 可见生物钻孔现象(灰泥等深岩), 盘家咀组, 第26层, 沅古坪剖面(-); c. 浅灰色粉屑灰岩(粉屑等深岩), 盘家咀组, 第15层, 沅古坪剖面; d. 浅灰色粉屑灰岩(粉屑等深岩), 盘家咀组, 第13层, 沅古坪剖面(-); e. 灰色砂屑灰岩(砂屑等深岩), 盘家咀组, 第24层, 九溪剖面; f. 砂屑灰岩(砂屑等深岩), 盘家咀组, 第18层, 九溪剖面(-); g. 浅灰色生物碎屑灰岩(生物碎屑等深岩), 盘家咀组, 第41层, 九溪剖面; h. 生物碎屑灰岩(生物碎屑等深岩), 盘家咀组, 第25层, 九溪剖面(-)

模糊,粉屑或灰泥常呈斑块状或不规则条带状(图4c)。灰泥或粉屑薄层侧向常不稳定,此显彼隐。上述特征以及清楚的潜穴等均反映了生物的强烈改造。粉屑等深岩镜下特征(图4d):粉屑组分约40%~60%,生物屑2%~8%,灰泥30%~55%,局部生物屑含量达15%,可见生物扰动构造。

2.3 砂屑等深岩

砂屑等深岩由砂屑灰岩组成,粒度较粗,特征明显。颗粒整体上分选差-较好,局部可分选很好,磨圆较好,中小型侵蚀界面十分发育(图4e)。该岩相重要特征为具有分选很好的富颗粒的小透镜体、不规则条带,甚至薄层。砂屑等深岩镜下特征(图4f):砂屑(多为中、细砂屑)40%~60%,粉屑10%~30%,生物屑(三叶虫屑、棘屑为主)3%~18%,灰泥20%~40%,亮晶胶结物2%~13%,个别含8%~20%的石英细砂。整体上分选差-较好,局部可分选很好。颗粒均有一定磨圆。

2.4 生物屑等深岩

生物屑等深岩主要以生物屑为主,含部分砂屑、粉屑,少量石英砂(图4g)。生物屑类型复杂,常以三叶虫、棘皮类为主。单层沉积常呈透镜状,透镜体大小悬殊,从1 cm至30 cm多,夹于细粒泥晶灰岩或生物屑泥晶灰岩中。该类岩相镜下特征(图4h):生物屑占50%以上,砂屑、粉屑20%左右,石英砂5%以下,灰泥基质仅5%~10%。生物屑类型复杂,常以三叶虫、棘皮类为主。颗粒分选较好,磨圆差-中等。

3 等深岩层序

不同类型的等深岩在空间上并不是孤立存在的,而是呈一种规律的层序分布的。一个完整的等深岩层

序包括5段,在垂向上颗粒粒度呈现由细到粗再到细的粒序,自下而上依次为灰泥等深岩—粉屑等深岩—砂屑等深岩—粉屑等深岩—灰泥等深岩。完整的等深岩层序可以反映等深流强度的周期性,在研究区少量发育。不完整层序在研究区较为普遍,且以缺失第4段者最多,其次为缺乏第2、第4段者。研究区发育3种不完整等深岩层序(图5):①单一灰泥等深岩组成的层序(A型);②灰泥等深岩与生物屑等深岩组成的层序(B型);③灰泥等深岩与砂屑等深岩组成的层序(C型)。

4 等深岩碳、氧同位素特征

4.1 样品采集及分析

本次所测样品均采自湖南省张家界市沅古坪盘家咀组下部实测剖面 and 桃源县九溪盘家咀组中上部实测剖面,共计22件样品(表1)。两个剖面的野外露头情况良好,我们主要选取未经蚀变的新鲜样品,避开方解石脉和风化作用严重的区域,以便样品能尽量反映原始沉积特征。所采样品主要包括该区原地沉积和等深流沉积两大类。在室内,对所采样品进行普通薄片制备并在镜下观察分析后,选取切开的新鲜且不含杂质部位的样品用研钵磨至200目,在25℃恒温真空条件下经磷酸法制成CO₂气体,在Finnigan MAT252型稳定同位素质谱仪上测出碳、氧同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(PDB标准),实验精度 $\sigma \leq 0.1\text{‰}$ 。所用样品均由同济大学海洋地质国家重点实验室测试。

4.2 原始性评估

古老地层中碳酸盐岩的同位素组成有可能受后期成岩蚀变的影响,已不能代表原始沉积物中稳定同位素的组成。因此,在利用碳、氧同位素做分析之前应判别其是否发生蚀变。常用的判别方法主要有:

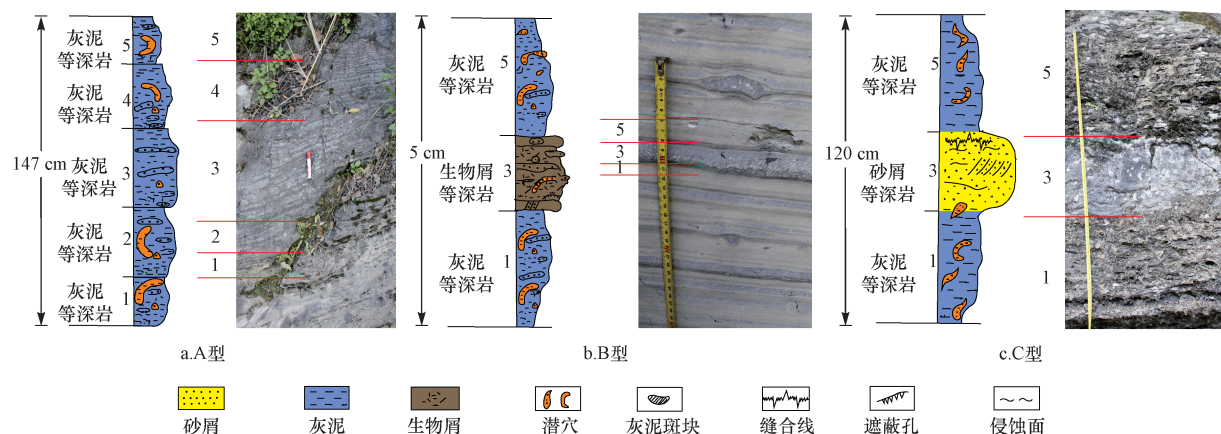


图5 研究区盘家咀组3种不完整等深岩层序

Fig. 5 Three types of incomplete contourite sequences in the Panjiazui Formation of the study area

表 1 研究区盘家咀组碳酸盐岩碳、氧同位素含量分析数据

Table 1 Carbon and oxygen isotopes in the carbonates of the Panjiazui Formation in the study area

层位	地区	样品编号	岩性	沉积类型	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{校正}}/\text{‰}$	温度指数 (T)/ $^{\circ}\text{C}$	盐度指数 (Z)
盘家咀组	九溪	J-3-3	深灰色含泥粉晶灰岩	原地沉积	0.68	-11.20	-1.90	26.778 4	123.613 0
		J-6-1	深灰色含云含泥粉晶灰岩	原地沉积	0.03	-9.91	-0.61	18.690 1	122.924 3
		J-6-2	深灰色含泥粉晶灰岩	原地沉积	0.99	-10.17	-0.87	20.052 5	124.760 9
		J-6-3	深灰色含泥粉晶灰岩	原地沉积	0.85	-10.42	-1.12	21.490 0	124.349 6
		J-7-5	浅灰色粉屑灰岩	等深岩层序 2	1.13	-10.21	-0.91	20.274 1	125.027 7
		J-7-4	浅灰色砂屑灰岩	等深岩层序 3	1.91	-12.29	-2.99	36.206 9	125.589 3
		J-20-2	浅灰色砂屑灰岩	等深岩层序 3	2.31	-10.88	-1.58	24.461 6	127.110 6
		J-26-1	灰色中层含泥纹砂屑灰岩	等深岩层序 3	2.13	-10.93	-1.63	24.810 1	126.717 1
		J-22-2	深灰色粉屑灰岩	等深岩层序 4	1.12	-10.85	-1.55	24.254 9	124.688 5
		J-7-6	浅灰色泥晶灰岩	等深岩层序 5	1.07	-10.57	-1.27	22.412 5	124.725 5
		J-8-1	浅灰色泥晶灰岩	单一灰泥层序	1.56	-10.74	-1.44	23.512 4	125.644 4
		J-22-1	灰色泥晶灰岩	单一灰泥层序	1.61	-10.93	-1.63	24.810 1	125.652 1
	沅古坪	Y-13-1-3	黄灰色泥晶灰岩	原地沉积	-0.83	-10.59	-1.29	22.538 9	120.824 3
		Y-44-1	深灰色含云泥晶灰岩	原地沉积	-0.15	-9.67	-0.37	17.552 5	122.675 1
		Y-32-1	浅灰色砂屑灰岩	等深岩层序 3	2.18	-10.28	-0.98	20.669 6	127.143 2
		Y-13-1-1	灰色泥晶灰岩	单一灰泥层序 1	0.19	-10.59	-1.29	22.538 9	122.913 3
		Y-13-1-2	灰色泥晶灰岩	单一灰泥层序 2	0.20	-10.39	-1.09	21.310 9	123.033 4
		Y-43-2	灰色泥晶灰岩	单一灰泥层序 3	0.44	-10.08	-0.78	19.565 6	123.679 3
		Y-39-1	浅灰色泥晶灰岩	单一灰泥层序 3	1.03	-10.20	-0.90	20.218 4	124.827 8
		Y-50-1	浅灰色泥晶灰岩	单一灰泥层序 3	0.63	-9.54	-0.24	16.984 4	124.337 3
		Y-53-1	浅灰色泥晶灰岩	单一灰泥层序 3	0.48	-10.40	-1.10	21.370 4	123.601 8
		Y-43-3	灰色泥晶灰岩	单一灰泥层序 4	0.18	-10.19	-0.89	20.162 9	123.092 0

注:等深岩层序 1、等深岩层序 2……等深岩层序 5 分别代表等深岩层序第一段、等深岩层序第二段……等深岩层序第五段。

1) $\delta^{18}\text{O}$ 的值。原岩中 $\delta^{18}\text{O}$ 值会因成岩后期的水-岩交换作用而明显降低。因此,碳酸盐岩氧同位素对是否发生蚀变作用比较灵敏,但此方法只可做定性的研究。Kaufman 等(1993,1995)常用的判断界限是 -5‰ 和 -11‰ 。当 $-11.0\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -5.0\text{‰}$ 时,表示样品受一定蚀变作用影响,但其值也可以代表沉积物中原始的碳、氧同位素组成;当 $\delta^{18}\text{O} < -11.0\text{‰}$ 时,表明样品受后期成岩蚀变作用严重,所测的同位素数值已不能代表沉积物中原始的碳、氧同位素组成,数据不宜使用^[10-11]。

2) $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关性。如果碳酸盐岩受到后期成岩蚀变作用的影响,其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值会表现出相关性;相反,如果未发生蚀变, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值会表现为离散性。

3) Mn/Sr 比值。成岩作用后期,受周围流体尤其是受大气水循环的影响,碳酸盐岩中会发生 Sr 值的降低和 Mn 值的升高。因此,Mn/Sr 比值是判断海相碳酸盐岩是否保持原始同位素沉积特征的灵敏指标。一般认为,Mn/Sr 小于 10 的碳酸盐岩基本保留了原始同位素的组成;而当 Mn/Sr 介于 2~3 之间时,碳酸盐岩很好地保持了原始同位素组成^[11]。

湖北九溪、沅古坪地区下奥陶统盘家咀组碳酸盐

岩样品由于地层年代较古老且受构造作用和大气降水的影响较强,因此采用 $\delta^{18}\text{O} > -11.0\text{‰}$ 的判别标准,可见只有两块样品可能受到了蚀变作用的影响(表 1);同时我们对所测样品分地区做了碳、氧同位素相关性分析(图 6),结果表明碳、氧同位素数值离散,基本上代表了原始沉积物碳、氧同位素组成。上述分析说明,研究区碳、氧同位素受后期成岩蚀变作用的影响组成稍有改变,但基本保持了原始状态,所得的碳、氧同位素数据是可用的。

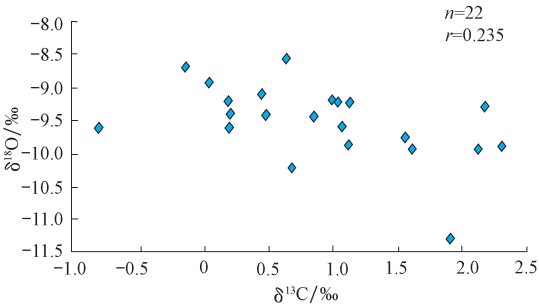


图 6 研究区盘家咀组碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值相关性散点图

Fig. 6 Scatter diagram showing relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of the carbonates in the Panjiazui Formation of the study area

(注: n 为样品个数; r 为相关系数。)

4.3 基本特征

本次我们对等深流沉积(灰泥等深岩、粉屑等深岩、砂屑等深岩)以及原地沉积分别采样做了碳、氧同位素分析。剔除两块可能发生蚀变的样品,研究区碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布于 $-0.83\text{‰} \sim 2.31\text{‰}$ (海相碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-5\text{‰} \sim 5\text{‰}$), $\delta^{18}\text{O}$ 值的范围为 $-10.93\text{‰} \sim -9.54\text{‰}$ 。其中,九溪地区的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $0.03\text{‰} \sim 2.31\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-10.93\text{‰} \sim -9.91\text{‰}$;沅古坪地区 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 $-0.83\text{‰} \sim 2.18\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值的范围为 $-10.59\text{‰} \sim -9.54\text{‰}$ (表1)。此外,研究区等深岩的碳同位素值均高于原地沉积物,不同类型的等深岩碳同位素值也不相同,其中以砂屑等深岩的碳同位素值最大,粉屑等深岩次之,灰泥等深岩最小(表2)。

4.4 地质意义

4.4.1 古海平面变化

自然界的碳主要储存在有机碳和无机碳两大碳库内。古海洋中无机碳的同位素组成控制着海相碳酸盐岩碳的同位素组成,而海相碳酸盐岩碳的同位素组成主要受有机碳埋藏量的影响。影响有机碳埋藏量的主要因素有:①古生物的大量繁殖和灭亡即生物产率。生物产率高,有机碳埋藏速率大,吸收的海洋中的 ^{12}C

多,因此海洋中的 ^{13}C 含量相应升高。②古气候的突变。研究表明,奥陶纪的生物群古生物能承受的温度变化仅为几度,因此气候的突变,必然会导致生物的大量灭亡,从而造成有机碳埋藏量的下降,使海水中 ^{12}C 富集^[12]。③海平面的变化。海平面升高时,有机碳的埋藏速率增加,同时古陆氧化面积减少,从而导致海水中 ^{13}C 含量升高^[13]。因此,碳同位素的变化主要受控于生物产率和海平面的变化,但随成岩作用的改造,显降低趋势;而氧同位素主要受水体的盐度与温度的影响。此外,大陆冰川的消融对氧同位素具有一定影响。在冰川期,由于海平面的下降和海水盐度的升高, ^{16}O 被束缚在冰盖层中,使海水 ^{18}O 富集;当冰川消融时,海平面升高、盐度降低, ^{16}O 被释放从而使海水 ^{16}O 富集。所以,氧同位素可以反映冰川的消融与凝聚^[12,14]。

对研究区不同岩相类型的碳同位素值进行统计,结果表明(表2;图7):①与原地沉积相比,等深岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值明显较高,表明等深岩与原地沉积的形成条件存在明显差异,等深岩主要发育在海平面较高的沉积环境,这也是区别等深岩与原地沉积的重要依据之一;②不同类型的等深岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值也不相同,其中以砂屑等深岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值最大,粉屑等深岩次之,灰泥等深岩最小,即随着等深岩的粒度变大, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值增高,表明海平面的上升为砂屑等深岩的形成创造了条件。

表 2 研究区盘家咀组不同岩相类型碳、氧同位素含量数据统计

Table 2 Carbon and oxygen isotopic statistics of different lithofacies in the Panjiaju Formation of the study area

岩相类型	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{校正}}/\text{‰}$	$T/^\circ\text{C}$	Z
原地沉积	$-0.83 \sim 0.99$ (0.178)	$-10.59 \sim -9.67$ (-10.152)	$-1.29 \sim -0.37$ (-0.852)	$17.55 \sim 22.54$ (20.065)	$120.82 \sim 124.76$ (123.107)
灰泥等深岩	$0.18 \sim 1.61$ (0.739)	$-10.93 \sim -9.54$ (-10.363)	$-1.63 \sim -0.24$ (-1.063)	$16.98 \sim 24.81$ (21.289)	$122.91 \sim 125.65$ (124.151)
粉屑等深岩	$1.12 \sim 1.13$ (1.125)	$-10.85 \sim -10.21$ (-10.530)	$-1.55 \sim -0.91$ (-1.230)	$20.27 \sim 24.25$ (22.265)	$124.69 \sim 125.03$ (124.860)
砂屑等深岩	$2.13 \sim 2.31$ (2.207)	$-10.93 \sim -10.28$ (-10.697)	$-1.63 \sim -0.98$ (-1.397)	$20.67 \sim 24.81$ (23.314)	$126.72 \sim 127.14$ (126.990)

注:()里的值为平均值。

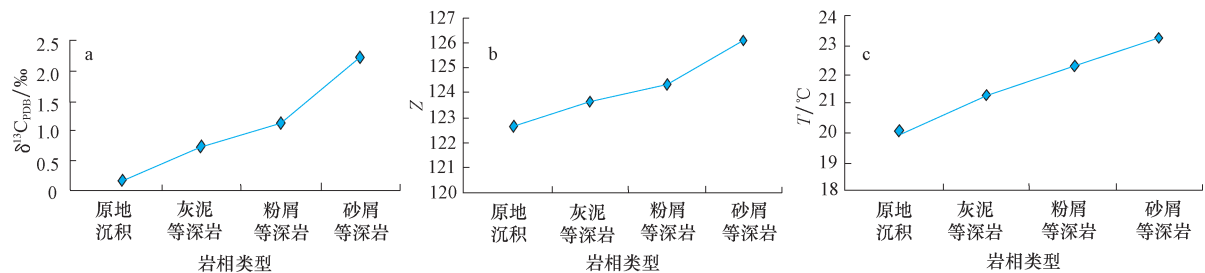


图 7 研究区不同岩相类型 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值(a)、 Z 值(b)、 T 值(c)均值曲线特征

Fig. 7 Curves of mean $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, Z and T of different lithofacies in the study area

4.4.2 古盐度

通过大量文献调研^[11,14-19], Keith 和 Weber^[20] 提出的利用灰岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值计算古盐度的公式应用较为普遍,其公式为:

$$Z = 2.048(\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 50) \quad (1)$$

本文对反映不同类型等深岩及原地沉积形成时期的古盐度标准值 Z 进行了计算(表1)。

研究分析表明(表2;图7):①该地区所有样品的 Z 值分布范围为 120.82 ~ 127.14,均大于 120,与该区为海相沉积环境相符合;②等深岩的 Z 值均高于原地沉积,表明等深岩形成在盐度相对较高的沉积环境中;③随着等深岩的粒度变大, Z 均值也增高,表明古盐度的升高有利于砂屑等深岩的形成。

4.4.3 古温度

由于“年代效应”的影响,对中生代以前的样品,因为受较强的成岩作用的影响,致使原始沉积物中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值因同位素交换而发生变化,从而降低了这些岩石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值指示古温度的可靠性^[20-21]。按照 Keith 和 Weber^[20] 给出的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 与地质年代的关系进行“年代效应”校正,其中研究区奥陶系盘家咀组 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 平均值为 -10.5‰,第四纪海相石灰岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 平均值为 -1.2‰,二者之差为 -9.3‰。我们用平均值 $\delta^{18}\text{O} = -9.3‰$ 作为“年代效应”校正值^[22],古温度按 Craig^[23] 氧同位素和古地温的关系公式进行计算:

$$T = 16.9 - 4.2(\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) + 0.13(\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)^2 \quad (2)$$

$$\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w = \delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} + 0.22 \quad (3)$$

据此在实验室中采取以 PDB 为标准的 CaCO_3 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}$)和以 SMOW(标准大洋水)为标准的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$)在用公式(2)计算温度时,需要对所测 $\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}$ 进行校正。由于目前奥陶纪古大洋水 $\delta^{18}\text{O}$ 仍为未知数,只能暂时假定与现代大洋水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相同,即取 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 0$ (SMOW 标准)。故此,本文在计算古温度时,对研究区样品实际用到的古温度计算公式为:

$$T = 16.9 - 4.2(\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3 \text{ 校正}} + 0.22) + 0.13(\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3 \text{ 校正}} + 0.22)^2 \quad (4)$$

对研究区奥陶系盘家咀组进行了碳、氧同位素分析,并计算出盘家咀组沉积期古温度范围为 16.98 ~ 24.81 °C(表1)。对不同类型等深岩及原地沉积的古温度进行统计(表2;图7),研究分析表明:①等深岩的

T 值均高于原地沉积,表明等深岩形成于古水温较高的沉积环境中,等深岩为间冰期的产物;②随着等深岩的粒度变大, T 均值也增高,表明古温度的升高有利于砂屑等深岩的形成。

4.4.4 等深岩层序的碳、氧同位素特征

本次为了研究单个等深岩层序形成时的古环境变化,我们对单个完整等深岩层序和单一灰泥等深岩组成的层序(A型)的第1段、第2段、第3段、第4段和第5段进行取样,并做碳、氧同位素分析。研究表明(图8):①无论是单一灰泥等深岩层序,还是完整的等深岩层序,由下至上, $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Z 值均呈现出先增加后减小的变化规律,表明等深岩层序的形成过程为海平面先上升后下降、盐度先增大后减小周期变化;②完整的等深岩层序由下至上还表现为 $\delta^{18}\text{O}$ 均值先减小后增大、 T 值先增大后减小的特征,表明等深岩层序的形成过程中古水温先增加后减小周期变化。这个等深岩层序形成时的古环境变化与实际情况是完全一致的。

以上各项沉积环境指标的研究表明,等深岩及其层序所形成的环境有别于浊流沉积、风暴沉积和其他一些事件沉积。仔细研究可发现,等深岩层序的形成既反映等深流活动由弱到强再变弱的周期性变化,也可反映当时沉积环境的变化规律。

当海平面开始升高,物源区远离沉积区,重力流减弱而等深流沉积发育,灰泥等深岩开始形成,由于此时水体中生物发育,造成了 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高;随着水体逐渐加深,等深流强度变大,出现粉屑等深岩,由于水体中古生物的减少, $\delta^{13}\text{C}$ 值稍微降低;当海平面达到最大值时,古生物已不发育,此时形成砂屑等深岩,等深流强度也最强,其 ^{13}C 出现正偏移;当海平面开始下降,等深流强度开始减弱, $\delta^{13}\text{C}$ 值降低,依次发育粉屑等深岩和灰泥等深岩,便形成了完整的等深岩层序。一个等深流活动的弱—强—弱的周期便形成了一个完整的等深岩层序,从下到上依次发育灰泥等深岩、粉屑等深岩、砂屑等深岩、粉屑等深岩和灰泥等深岩, $\delta^{13}\text{C}$ 值也呈现周期性的变化。当整个地区等深流强度较低而周期性变化较频繁时,则会形成小范围周期性的弱—强—弱的变化,从而形成由若干个等深流活动周期叠加而成的单一灰泥等深岩层序,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值也呈周期性的变化规律。而碳、氧同位素反映的盐度和温度,是等深流这种温—盐环流形成的基础条件。

4.4.5 等深岩剖面的碳、氧同位素特征

研究区盘家咀组下部(沅古坪剖面)主要以灰泥等深岩和原地沉积为主,等深岩的发育比为 13.7%;盘家咀组中上部(九溪剖面)主要以砂屑等深岩、灰泥

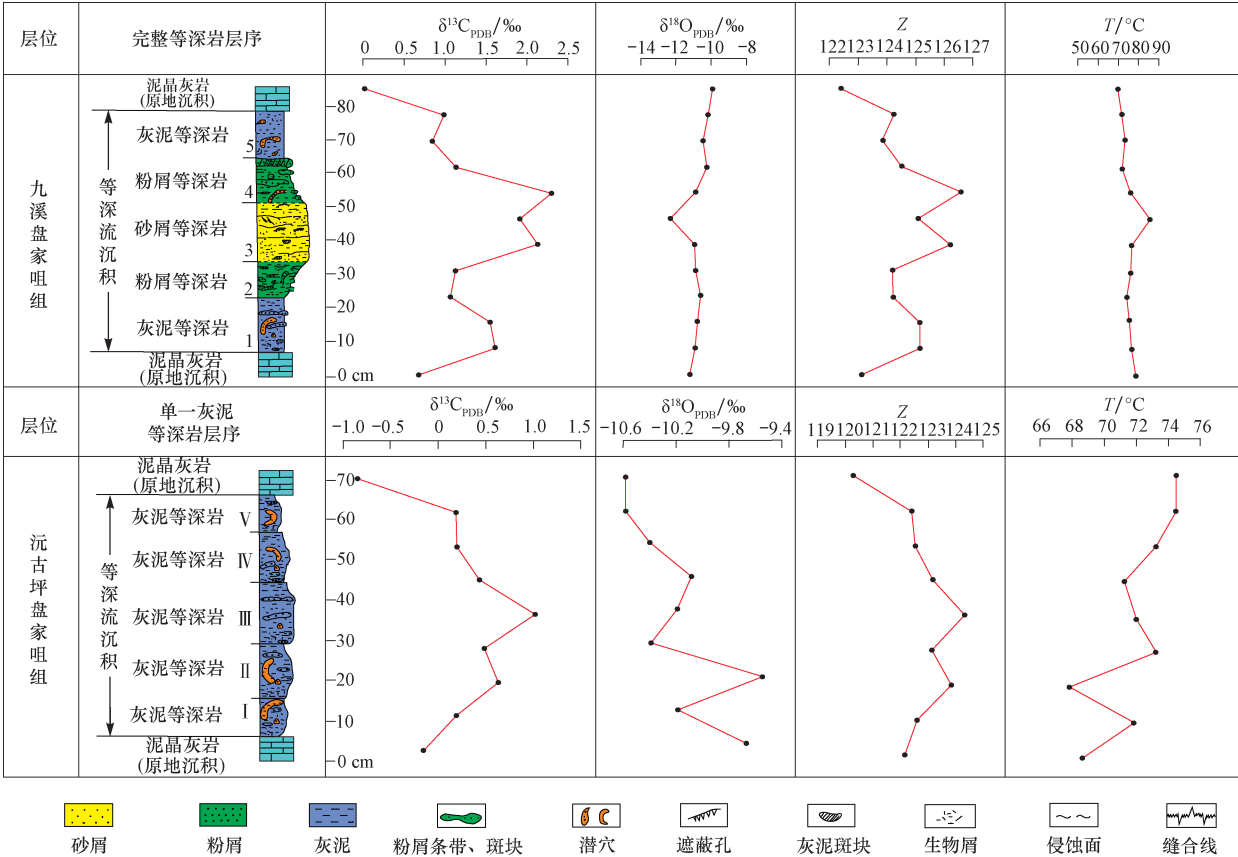


图 8 九溪、沅古坪盘家咀组等深岩层序碳、氧同位素曲线

Fig. 8 Carbon and oxygen isotope curves of the contourite sequences in the Panjiazui Formation of Jiuxi and Yuanguiping areas

表 3 研究区盘家咀组不同岩相类型碳、氧同位素含量数据统计

Table 3 Carbon and oxygen isotope statistics of different lithofacies in the Panjiaju Formation of the study area

岩相类型	岩相	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	Z	T/°C
盘家咀组中上部	等深岩	1.07 ~ 2.31 (1.605)	-9.93 ~ -9.21 (-9.925)	122.92 ~ 124.76 (124.012)	19.20 ~ 22.10 (20.637)
	原地沉积	0.03 ~ 0.99 (0.638)	-10.20 ~ -8.91 (-9.425)	124.69 ~ 127.11 (125.756)	20.84 ~ 25.52 (24.177)
盘家咀组下部	等深岩	0.18 ~ 2.18 (0.666)	-9.59 ~ -8.54 (-9.209)	120.82 ~ 122.68 (121.750)	18.01 ~ 23.18 (20.586)
	原地沉积	-0.83 ~ -0.15 (-0.490)	-9.59 ~ -8.67 (-9.130)	122.91 ~ 127.14 (124.079)	17.41 ~ 23.18 (20.920)

注:()里的值为平均值。

等深岩和原地沉积为主,等深岩的发育比为78.7%,粗粒等深岩(包括砂屑和细砾屑等深岩)占剖面厚度的10.7%,细粒等深岩(粉屑等深岩和灰泥等深岩)为68.0%。无论是从等深岩粒度还是等深岩发育比例来看,盘家咀组中上部(九溪剖面)等深流沉积均较为发育。对研究区盘家咀组不同层位进行碳、氧同位素特征统计分析,研究表明(表3):①与原地沉积相比,等深岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、Z值、T值均较高, $\delta^{18}\text{O}$ 值均较低,表明等深岩与原地沉积的形成条件不同,等深岩主要发育在海平面较高的沉积环境;②盘家咀组中上部地层的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、Z值、T值均值高于下部地层,而 $\delta^{18}\text{O}$ 均值低于下部地

层,表明盘家咀组沉积期海平面逐渐升高、古盐度和古水温逐渐增大的演化环境,这与盘家咀组沉积期等深流活动逐渐增强相对应。

5 结论

1) 工区下奥陶统盘家咀组发育有灰泥等深岩、粉屑等深岩、砂屑等深岩、砾屑等深岩和生物屑等深岩5种等深岩相。其中,灰泥等深岩在盘家咀组下部(沅古坪地区)较为发育,砂屑等深岩在盘家咀组中上部(九溪地区)较为发育。

2) 等深岩在垂向上主要发育由单一灰泥等深岩叠置组成的层序、灰泥等深岩与生物屑等深岩组成的层序和灰泥等深岩与砂屑等深岩组成的层序3种不完整等深岩层序和少量的完整等深岩层序。

3) 工区下奥陶统盘家咀组灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布于 $-0.83\% \sim 2.31\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 值的范围为 $-10.93\% \sim -9.54\%$ 。此外,研究区等深岩的碳同位素值均高于原地沉积物,不同类型的等深岩碳同位素值也不相同,其中以砂屑等深岩的碳同位素值最大,粉屑等深岩次之,灰泥等深岩最小。

4) 通过碳、氧同位素值计算研究区盘家咀组盐度指数 Z 值介于 $120.82 \sim 127.14$, 与该区为海相沉积环境相符合。与原地沉积相比,等深岩的 Z 值均较高,且随着等深岩的粒度变大, Z 均值也逐渐增高,表明古盐度的升高有利于砂屑等深岩的形成。

5) 通过对碳、氧同位素值进行校正计算,研究区盘家咀组沉积期古温度 T 值范围为 $16.98 \sim 24.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与原地沉积相比,随着等深岩的粒度变大, T 均值均逐渐增高,表明古温度的升高有利于砂屑等深岩的形成。

6) 与原地沉积相比,等深岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 Z 值、 T 值均较高, $\delta^{18}\text{O}$ 值均较低,表明等深岩主要形成于高盐度的较深水环境中,且盐度、水温越高,越有助于高能等深流沉积物砂屑等深岩和生物屑等深岩的形成。等深岩层序的形成周期均表现为古盐度、古水温、海平面先增大后减小的周期性变化。

参 考 文 献

- [1] 何幼斌,高振中,罗顺社,等.等深流沉积的特征及其鉴别标志[J].江汉石油学院学报,1998,20(4):1-6.
He Youbin, Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, et al. Features of contourites and their discrimination[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1998, 20(4): 1-6.
- [2] 刘宝珺,余光明,王成善.珠穆朗玛峰地区侏罗系的等深岩沉积及特征[J].成都地质学院学报,1982,9(1):1-6.
Liu Baojun, Yu Guangming, Wang Chengshan. The other deep sedimentary rocks and sedimentary characteristics of Jurassic in the Everest region[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1982, 9(1): 1-6.
- [3] 姜在兴,赵澄林,熊继辉.皖中下志留统的等深岩及其地质意义[J].科学通报,1989,34(20):1575-1576.
Jiang Zaixing, Zhao Chenglin, Xiong Jihui. The Middle-Lower Silurian contourites in Anhui province and their geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(20): 1575-1576.
- [4] 虞子治,施央申,郭令智.广西钦州盆地志留纪一中泥盆世等深流沉积及其大地构造意义[J].沉积学报,1989,7(3):21-29.
Yu Ziyi, Shi Yangshen, Guo Lingzhi. The paleocontourite and its tectonic significance in Qinzhou Basin, Guangxi, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(3): 21-29.
- [5] 段太忠,郭建华,高振中,等.华南古大陆边缘湖北九溪下奥陶统碳酸盐等深岩[J].地质学报,1990,64(2):131-143.
Duan Taizhong, Guo Jianhua, Gao Zhenzhong, et al. A Lower Ordovician carbonate contourite drift on the margin of the south China palaeo-continent in Jiuxi, northern Hunan[J]. Acta Geologica Sinica, 1990, 64(2): 131-143.
- [6] 刘宝珺,许效松,梁仁枝.湘西黔东南寒武纪等深流沉积[J].矿物岩石,1990,10(4):43-47.
Liu Baojun, Xu Xiaosong, Liang Renzhi. Contourites of Cambrian in western Hunan and eastern Guizhou[J]. Mineralogy and Petrology, 1990, 10(4): 43-47.
- [7] 高振中,罗顺社,何幼斌,等.鄂尔多斯地区西缘中奥陶世等深流沉积[J].沉积学报,1995,13(4):16-25.
Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, He Youbin, et al. The Middle Ordovician contourite on the west margin of Ordos[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(4): 16-25.
- [8] 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, 1976, 23(4): 511-532.
- [9] 葛祥英,牟传龙,周恩恩,等.湖南奥陶纪沉积演化特征[J].中国地质,2013,40(6):1829-1841.
Ge Xiangying, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, et al. Characteristics of Ordovician sedimentary evolution in Hunan province[J]. Geology in China, 2013, 40(6): 1829-1841.
- [10] Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. The vendian record of Sr and C-isotopic variations in seawater: Implications for tectonic and paleoclimate[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 120(3-4): 409-430.
- [11] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications[J]. Precambrian Research, 1995, 73(1-4): 27-49.
- [12] 严兆彬,郭福生,潘家永,等.碳酸盐岩 C、O、Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J].地质找矿论丛,2005,20(1): 53-56.
Yan Zhaobin, Guo Fusheng, Pan Jiayong, et al. Application of C, O and Sr isotope composition of carbonates in the research of paleoclimate and paleoceanic environment[J]. Geology and Mineral Resources Research, 2005, 20(1): 53-56.
- [13] 陈强,张慧元,李文厚,等.鄂尔多斯奥陶系碳酸盐岩碳氧同位素特征及其意义[J].古地理学报,2012,14(1):117-124.
Chen Qiang, Zhang Huiyuan, Li Wenhui, et al. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of the Ordovician carbonate rocks in Ordos and their implication[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 117-124.
- [14] 罗顺社,汪凯明.河北宽城地区中元古代高庄组碳酸盐岩碳氧同位素特征[J].地质学报,2010,84(4):492-499.
Luo Shunshu, Wang Kaiming. Carbon and oxygen isotope composition of carbonate rock from the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in the Kuancheng area, Hebei province[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(4): 492-499.
- [15] 刘德良,孙先如,李振生,等.鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩碳氧同位素分析[J].石油实验地质,2006,28(2):155-160.
Liu Deliang, Sun Xianru, Li Zhenheng, et al. Analysis of carbon and oxygen isotope on the Ordovician dolostones in the Ordos basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(2): 155-160.
- [16] 张秀莲.碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系

- [J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 17–29.
- Zhang Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(4): 17–29.
- [17] 罗顺社, 张建坤, 汪凯明, 等. 燕山地区中元古界碳酸盐岩碳、氧同位素特征及其环境意义[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(6): 18–24.
- Luo Shunshe, Zhang Jiankun, Wang Kaiming, et al. The Mesoproterozoic carbonate carbon and oxygen isotopic characteristics and its environmental significance in Yanshan area [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(6): 18–24.
- [18] 旷红伟, 李家华, 罗顺社, 等. 燕山地区 1.6 ~ 1.0 Ga 时期碳酸盐岩碳、氧同位素组成、演化及其地质意义[J]. 地学前缘, 2009, 16(5): 118–133.
- Kuang Hongwei, Li Jiahua, Luo Shunshe, et al. The C and O isotopic compositions and their evolution recorded in the carbonate interval of the Yanshan area from 1.6 to 1.0 Ga, and their geological implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(5): 118–133.
- [19] Korte C, Kozur H W, Veizer J. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of Triassic brachiopods and carbonate rocks as proxies for coeval seawater and palaeotemperature [J]. *Palaeogeography*, 2005, 226(2): 287–306.
- [20] Keith M H, Weber J N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestone and fossils [J]. *Geochem Cosmochim Acta*, 1964, 28(10): 1787–1816.
- [21] Mackenzie F T. Sedimentary cycling and the evolution of sea water [C]// Riley J P. *Chemical oceanography* (2nd ed). London: Academic Press, 1975: 309–364.
- [22] 邵龙义. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(1): 39–45.
- Shao Longyi. The relation of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature etc [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1994, 23(1): 39–45.
- [23] Craig H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water [J]. *Science*, 1961, 133(23): 1833–1834.

(编辑 李 军)

(上接第 735 页)

- Jin Qiang, Kang Xun, Rong Yuanshuai, et al. Sedimentary characteristics of sandstones and mudstones deposited in the surface rivers and subsurface rivers in the Ordovician carbonate karst, Tahe Oilfield [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2015, in press.
- [23] 金强, 康迅, 田飞. 塔河油田奥陶系古岩溶径流带缝洞化学充填物成因分析[J]. 石油学报, 2015, 待刊.
- Jin Qiang, Kang Xun, Tian Fei. Investigations on chemical fillings in fracture-caves in Paleo-karst runoff zone in Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, in press.
- [24] 徐国强, 李国蓉, 刘树根, 等. 塔里木盆地早海西期多期次风化壳岩溶洞穴层[J]. 地质学报, 2005, 79(4): 558–568.
- Xu Guoqiang, Li Guorong, Liu Shugen, et al. Cave layers formed multiple times of weathering crusts in Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(4): 558–568.
- [25] 鲁新便, 何成江, 邓光校, 等. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 268–274.
- Lu Xinbian, He Chengjiang, Deng Guangxiao, et al. Description on paleo-river channels in Ordovician karst reservoirs, Tahe Oilfield [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 268–274.
- [26] 李朋, 任建业, 阳怀忠, 等. 巴楚地区断裂带内热液流体活动及对碳酸盐岩改造的特征分析[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 378–385.
- Li Peng, Ren Jianye, Yang Huaizhong, et al. Thermal fluid activity in fault system in Bachu area and its cation on carbonates [J]. *Geotectonica et Metallogeny*, 2011, 35(3): 378–385.
- [27] 李会军, 丁勇, 周新桂, 等. 塔河油田奥陶系海西早期、加里东中期岩溶对比研究[J]. 地质论评, 2010, 56(3): 71–75.
- Li Huijun, Ding Yong, Zhou Xingui, et al. Comparison on Ordovician karsts formed in early Hercynian and in middle Caledonian in Tahe Oilfield [J]. *Geological Review*, 2010, 56(3): 71–75.
- [28] 康志宏, 陈琳, 鲁新便, 等. 塔河岩溶型碳酸盐岩缝洞系统流体动态连通性研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 110–120.
- Kang Zhihong, Chen Lin, Lu Xinbian, et al. Dynamic connection study on karst carbonate fracture-cave systems in Tahe Oilfield [J]. *Geological Front*, 2012, 19(2): 110–120.
- [29] 田飞, 金强, 李阳, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型储层小型缝洞及其充填物测井识别[J]. 石油与天然气地质, 2012, 36(6): 900–908.
- Tian Fei, Jin Qiang, Li Yang, et al. Identification of small fracture-vugs and their fillings through log interpretation in fracture-vuggy Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 36(6): 900–908.
- [30] 金强, 田飞, 张宏方. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞单元综合评价[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 272–279.
- Jin Qiang, Tian Fei, Zhang Hongfang. Comprehensive evaluation of fracture-cave units in karst carbonates in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(3): 272–279.
- [31] 林忠民. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征及成藏条件[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 23–27.
- Lin Zhongmin. Reservoir features of Ordovician carbonates and oil accumulations in Tahe Oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(3): 23–27.

(编辑 张玉银)