

词,是由底栖微生物群落(BMC)捕获和黏结碎屑沉积物,或经与微生物活动相关的无机或有机诱导矿化作用在原地形成的沉积物(岩)^[27-28],即为生物成因碳酸盐岩,柴达木盆地新生代生物成因类型碳酸盐岩主要为藻灰/云岩类。根据藻灰/云岩的全岩矿物成分测试数据(表2,表中数据为矿物成分的体积分数),碳酸盐岩组分体积分数为52%~88%(其中

方解石组分体积分数为11%~75%,白云石体积分数为9%~71%,以铁白云石为主),石英+长石体积分数为2%~28%,黏土矿物体积分数为3%~31%。藻灰/云岩类碳酸盐岩根据产状细分为藻叠层灰/云岩、藻纹层灰/云岩、藻团块灰/云岩及藻泥晶灰/云岩(图3)。

表 2 柴西地区碳酸盐岩全岩矿物测试资料(部分)

Table 2 Test data of total rock minerals in carbonate rocks in western Qaidam Basin(part)														%
井号	岩性	石英	钾长石	钠长石	方解石	白云石	黄铁矿	赤铁矿	方沸石	角闪石	石膏	硬石膏	铁白云石	黏土
G4	砂质颗粒灰/云岩	19.67	2.02	13.07	17.36	—	0.28	—	1.50	—	—	—	33.37	12.73
L3	砂质颗粒灰/云岩	14.44	2.61	15.56	13.40	—	0.85	—	—	—	—	—	37.36	15.78
N102	砂质颗粒灰/云岩	12.22	0.34	22.25	13.88	—	2.10	—	—	—	—	—	27.79	21.42
Y87	泥晶灰/云岩	2.90	—	—	27.70	—	—	5.1	—	—	—	—	58.70	5.70
YH106X	泥晶灰/云岩	4.60	—	2.20	14.40	68.70	—	—	0.90	—	—	—	—	9.20
F4	含砂藻叠层灰/云岩	7.98	0.36	8.29	41.28	—	1.90	—	0.45	—	—	—	25.76	14.00
F5	藻叠层灰/云岩	1.27	—	4.51	14.96	—	1.52	—	—	—	0.58	10.30	63.42	3.44
J2	含砂藻叠层灰/云岩	19.49	—	10.12	20.06	—	3.43	—	—	—	1.91	—	18.19	26.80
JX1	含砂藻团块灰/云岩	11.11	0.20	9.33	29.69	—	—	—	1.72	—	0.46	1.06	35.93	10.50
JX1	藻叠层灰/云岩	3.33	—	3.78	44.29	—	2.17	—	—	—	—	—	42.32	4.10
L3	含砂藻叠层灰/云岩	13.63	—	14.04	21.81	10.63	1.30	—	0.11	—	—	6.64	22.04	9.80
N102	藻叠层灰/云岩	2.45	0.31	6.28	57.29	—	0.40	—	—	—	—	3.40	26.42	3.45
N7	含砂藻纹层灰/云岩	2.94	0.77	10.71	15.25	—	—	—	0.68	—	—	—	56.44	13.20
N9	含砂藻纹层灰/云岩	10.05	2.01	8.08	40.60	6.33	1.72	—	0.42	—	—	—	20.73	10.06
NQ3-06	藻纹层灰/云岩	3.84	0.31	9.79	37.78	—	1.16	—	—	—	—	5.08	37.64	4.40
NQ3-3	含砂藻叠层灰/云岩	10.84	2.14	10.69	32.99	—	0.13	—	0.64	—	—	—	32.55	10.01
NQ5-5	藻纹层灰/云岩	7.58	0.72	6.42	60.82	2.40	1.17	—	—	—	—	—	13.18	7.67
X19	藻叠层灰/云岩	3.90	—	4.65	75.55	—	0.33	—	—	—	—	—	11.15	4.42
X20	含砂藻叠层灰/云岩	6.68	1.56	5.48	13.72	—	0.31	—	1.59	—	—	—	63.10	7.58
X20	含砂藻纹层灰/云岩	7.94	1.46	6.44	37.39	—	1.91	—	3.36	—	0.37	—	33.83	7.29
X21	藻纹层灰/云岩	3.69	0.55	1.93	33.22	—	0.13	—	2.02	—	—	—	54.72	3.75

注:“—”代表含量低于检查下限。

(1)藻叠层灰/云岩。在滨浅湖的高能、清水、富氧环境中,藻呈叠锥状或柱状生长形成藻叠层灰/云岩,主要包括富藻纹层和贫藻纹层,富藻纹层形成于适合藻类生长的非风暴期,以藻类为主,颜色暗,贫藻纹层由于受风暴环境影响,藻灰不发育,藻纹层不明显,颜色浅,藻叠层灰/云岩的规模一般很小,厚度最大仅25 cm。柴达木盆地粗枝藻常见,藻体之间充填有藻泥晶灰/云岩、泥晶灰/云岩、陆屑泥晶灰/云岩和颗粒灰/云岩等(图3(a)、(b))。

(2)藻纹层灰/云岩。在浅湖的清水、富氧环境中,在水动力条件较弱的条件下,藻呈水平纹层状或波状生长形成藻纹层灰/云岩,泥质、粉砂质等碎屑物含量低或不含藻丝体,具早期固结作用,形成藻架孔(图3(c)、(d))。

(3)藻团块灰/云岩。在高能的滨浅湖环境中,由藻体分泌的黏液不断捕集黏结灰泥形成藻团块,呈不规则的多边形或团块状,规模较大,厚度一般为

1~5 m,最厚可达8 m,内部碎屑物泥质含量较高,藻团块粒径0.2~5 mm不等,多为1~2 mm。压实作用较强,使得藻团块紧密相接,团块之间易发生淡水淋溶,形成藻格架次生溶孔,溶孔发育,但藻团块自身几乎不溶解(图3(e)~(g))。

(4)藻泥晶灰/云岩。藻泥晶灰/云岩是较常见的碳酸盐岩石类型,主要形成于低能滨浅湖环境,其特征是藻纹层及藻叠层构造不明显,但具藻结构(藻丝体)特征,含陆源碎屑。藻泥晶灰/云岩的溶蚀孔不发育,仅局部见到(图3(h)、(i))。

2.1.2 机械与化学复合成因类碳酸盐岩

过去一直认为碳酸盐岩沉积物只有化学成因,现在的观点认为碳酸盐岩的沉积受到水动力的控制作用,在结构和构造上有所反映。从20世纪70年代发现的鲕粒、团粒、生物骨架、内碎屑等碳酸盐岩颗粒等,认为是经过机械搬运堆积起来的。柴达木盆地机械与化学复合成因的碳酸盐岩主要有颗粒

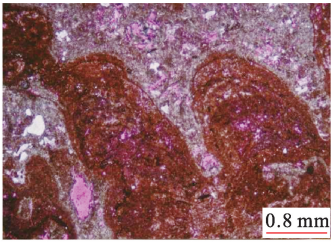
灰/云岩和泥晶灰/云岩。

(1) 颗粒灰/云岩类。颗粒灰/云岩亦称为粒屑灰岩,是指颗粒体积分数大于 50% 的石灰岩,颗粒有内碎屑、鲕粒、生物碎屑、藻粒、球粒等。根据颗粒灰/云岩全岩矿物成分测试数据(表 2),碳酸盐岩组分体积分数为 37% ~ 50% (其中方解石组

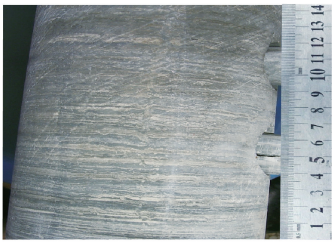
分体积分数为 13% ~ 32%,白云石体积分数为 15% ~ 38%,以铁白云石为主),石英+长石体积分数为 29% ~ 37%,黏土矿物体积分数为 12% ~ 27%。按照粒径大小,划分为砾屑灰/云岩(图 4(a)、(b)),砂屑灰/云岩(图 4(c)、(d)、(f)),粉屑灰/云岩(图 4(e))。



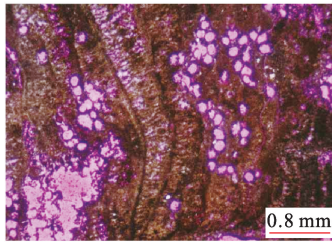
(a) YH105, 3 023.50~3 023.60 m, 藻叠层灰/云岩



(b) YX4, 1 387.4 m, 藻叠层灰/云岩, 单偏光, 红色铸体



(c) NQ3-3, 1 250.1~1 250.24 m, 藻纹层灰/云岩



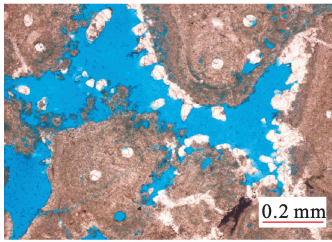
(d) YX4, 1 387.45 m, 藻纹层灰/云岩, 单偏光, 红色铸体



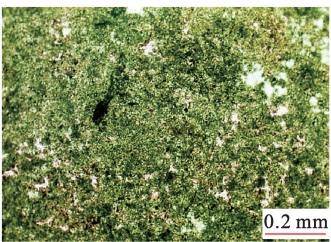
(e) W11-1401, 1 346.16~1 346.24 m, 藻团块灰/云岩



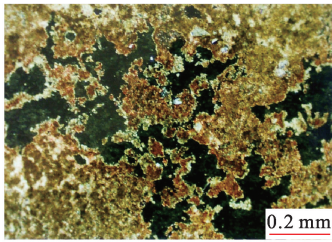
(f) 西岔沟剖面, E32, 藻团块灰/云岩



(g) W11-1401, 1 350.49 m, 藻团块灰/云岩, 单偏光, 蓝色铸体



(h) X19, 440 m, 藻泥晶灰/云岩, 单偏光, 红色铸体



(i) G5, 2 430 m, 藻泥晶灰/云岩, 正交光

图 3 柴达木盆地新生代藻灰/云岩类典型照片

Fig. 3 Typical photographs of Cenozoic algal limestone in Qaidam Basin

(2) 泥晶灰/云岩。泥晶灰/云岩又称为灰泥岩、微晶灰/云岩,是碳酸盐岩主要类型之一,几乎全由粒径为 0.001 ~ 0.004 mm 的灰泥组成,仅含少量异化粒,它在结构上相当于陆源黏土岩,常形成于低能环境。根据泥晶灰/云岩全岩矿物成分测试数据(表 2),碳酸盐岩组分体积分数为 30% ~ 86% (其中方解石组分体积分数为 9% ~ 28%,白云石体积分数为 8% ~ 69%,以铁白云石为主),石英+长石体积分数为 2% ~ 45%,黏土矿物体积分数为 5% ~ 30%。可细分为纹层状泥晶灰/云岩(图 5(a)、

(b)),块状泥晶灰/云岩(图 5(c)),纹层状泥晶灰/云岩可见层间缝。

2.2 碳酸盐岩物性特征

对柴达木盆地新近系钻井取芯碳酸盐岩层段进行岩心(柱塞)取样,依据 SY/T 5336-2006《岩心分析方法》采用 Ultra Pore-400 型孔隙度测定仪和 DX-07G 型渗透率测定仪进行岩石孔隙度、渗透率测试,孔隙度分布在 5% ~ 28%,渗透率分布区间较大,最高可达到 $2\,484 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最低小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 3)。

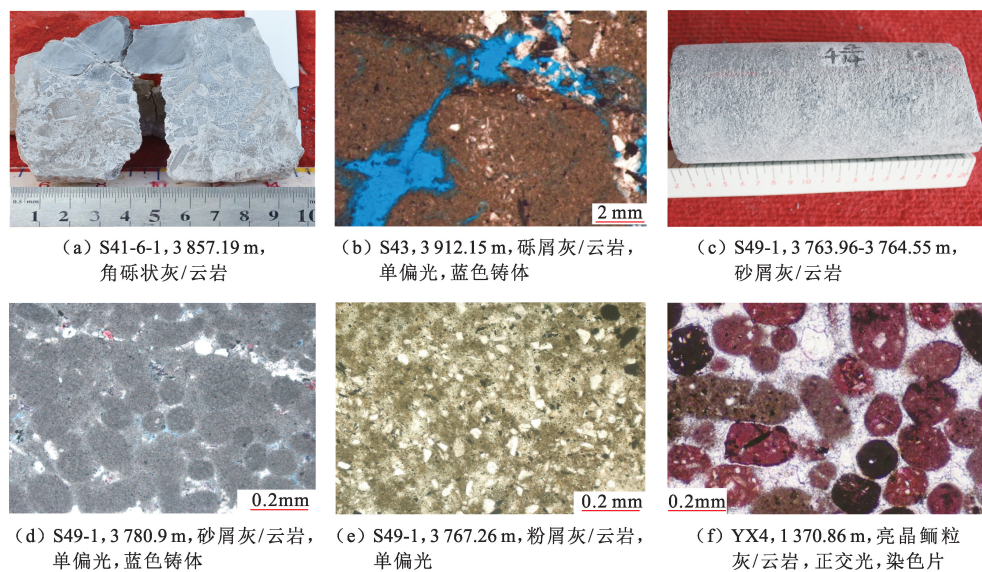


图 4 柴达木盆地新生代颗粒灰/云岩类典型照片

Fig. 4 Typical photographs of Cenozoic granular limestone in Qaidam Basin

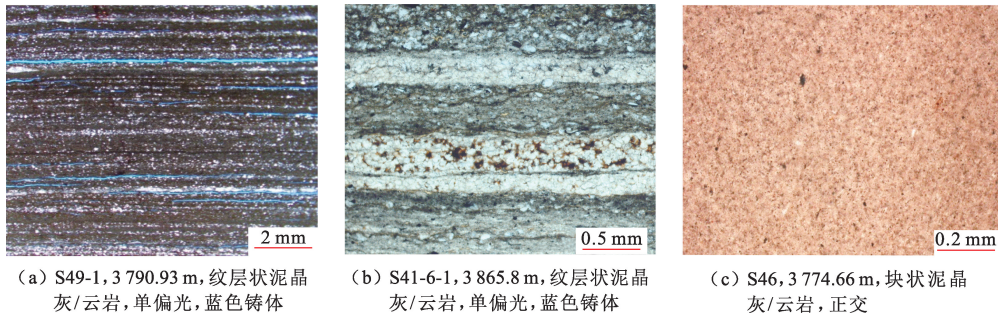


图 5 柴达木盆地新生代泥晶灰/云岩典型照片

Fig. 5 Typical photographs of Cenozoic argillaceous limestone in Qaidam Basin

表 3 柴达木盆地新近系碳酸盐岩孔隙度、渗透率测试数据(部分)

Table 3 Test data for porosity and permeability of Neogene carbonate rocks in Qaidam Basin(part)

井号	岩性	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	井号	岩性	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
NQ3-3	砂质颗粒灰/云岩	14. 86	4. 06	J2	藻叠层灰/云岩	15. 10	0. 20
NQ5-5	颗粒灰/云岩	8. 53	0. 03	JX1	藻纹层灰/云岩	8. 30	0. 16
NQ5-5	砂质颗粒灰/云岩	13. 88	0. 16	L101	藻团块灰/云岩	21. 30	—
ST1	颗粒灰/云岩	6. 90	0. 03	L101	藻团块灰/云岩	28. 10	—
Y69	砂质颗粒灰/云岩	26. 60	125. 50	L101	藻叠层灰/云岩	15. 60	—
Y84	颗粒云灰/云岩	9. 40	<0. 05	N102	藻纹层灰/云岩	12. 00	0. 76
Y87	颗粒灰/云岩	7. 80	<0. 02	NQ5-5	藻叠层灰/云岩	15. 45	0. 01
YH106X	砂质颗粒灰/云岩	10. 37	20. 31	Q6-5	藻叠层灰/云岩	19. 14	7. 15
H34	泥晶灰/云岩	5. 30	1. 60	Q6-5	藻纹层灰/云岩	9. 51	0. 02
K3	泥晶灰/云岩	20. 90	0. 50	ST1	藻纹层灰/云岩	7. 40	0. 02
L101	泥晶灰/云岩	19. 50	0. 29	W11-1401	藻团块灰/云岩	17. 90	31. 10
L3	泥晶灰/云岩	16. 90	0. 08	W11-1401	藻团块灰/云岩	17. 07	110. 40
Q6-5	泥晶灰/云岩	10. 40	0. 04	X20	藻叠层灰/云岩	16. 60	0. 02
Q6-5	泥晶灰/云岩	8. 22	0. 01	X21	藻纹层灰/云岩	8. 10	0. 01
WD3	泥晶灰/云岩	5. 00	0. 0	Y109	藻团块灰/云岩	23. 11	—
WD6	泥晶灰/云岩	5. 34	<0. 02	Y109	藻团块灰/云岩	18. 82	—
Y69	泥晶灰/云岩	18. 00	2. 40	Y15	藻叠层灰/云岩	15. 70	18. 70
Y84	泥晶灰/云岩	9. 50	1. 21	Y69	藻叠层灰/云岩	15. 00	13. 80
Y87	泥晶灰/云岩	9. 54	<0. 02	Y69	藻团块灰/云岩	19. 50	471. 60
YH106X	泥晶灰/云岩	10. 66	0. 03	Y69	藻团块灰/云岩	25. 00	33. 90
YH106X	泥晶灰/云岩	6. 68	<0. 02	Y69	藻团块灰/云岩	27. 90	191. 40
YH106X	泥晶灰/云岩	13. 12	0. 07	Y84	藻团块灰/云岩	16. 70	42. 78
YH106X	泥晶灰/云岩	7. 53	<0. 02	Y87	藻纹层灰/云岩	5. 05	<0. 02
F4	藻纹层灰/云岩	7. 40	0. 10	YH106X	藻叠层灰/云岩	12. 00	0. 02
F5	藻纹层灰/云岩	6. 37	0. 26				

注:“—”代表未计算渗透率,只测量核磁孔隙度。

从不同类型碳酸盐岩的孔隙度对比(表4)分析,藻灰/云岩储层物性最好,孔隙度为5.05%~28.1%,平均为15.39%;其次为颗粒灰/云岩,孔隙度为6.9%~26.9%,平均为13.85%;泥晶灰/云岩,孔隙度为5.0%~20.9%,平均为11.50%。另外,从单一类型碳酸盐岩孔隙度分析(表5)来看,藻灰/云岩孔隙度集中分布在15%~20%,分布频率占43.2%,不同类型藻灰岩的储层物性亦有差异性;颗粒灰/云岩孔隙度集中分布在10%~20%,分布频率占71.4%;泥晶灰/云岩孔隙度集中分布在

10%~15%,分布频率占78.2%。

表4 柴达木盆地不同类型碳酸盐岩孔隙度对比
Table 4 Porosity comparison of different types of carbonate rocks in Qaidam Basin

碳酸盐岩类型	孔隙度最小值/%	孔隙度最大值/%	孔隙度平均值/%	样品个数
藻团块灰/云岩	15.18	28.1	16.69	18
藻叠层灰/云岩	10.70	24.0	16.05	12
藻纹灰/云岩	5.05	12.0	8.06	14
颗粒灰/云岩	6.90	26.9	13.85	14
泥晶灰/云岩	5.00	20.9	11.50	32

表5 柴达木盆地不同类型碳酸盐岩孔隙度分布频率对比

Table 5 Comparison of porosity distribution frequencies of different types of carbonate rocks in Qaidam Basin

碳酸盐岩类别		孔隙度				
		<10%	10%~15%	15%~20%	20%~25%	>25%
藻团块灰/云岩	分布频率/%	0	0	61	17	22
	样品个数	0	0	11	3	4
藻叠层灰/云岩	分布频率/%	0	33	58	9	0
	样品个数	0	4	7	1	0
藻纹层灰/云岩	分布频率/%	86	14	0	0	0
	样品个数	12	2	0	0	0
颗粒灰/云岩	分布频率/%	35.7	35.7	14.3	7.1	7.1
	样品个数	5	5	2	1	1
泥晶灰/云岩	分布频率/%	43.8	34.4	18.9	3.1	0
	样品个数	14	11	6	1	0

3 碳酸盐岩沉积特征及发育模式

3.1 碳酸盐岩沉积相类型

基于前人的碳酸盐岩研究成果,结合柴达木盆地碳酸盐岩发育特征,划分藻丘(席)、颗粒滩、灰/云坪3种沉积微相类型。

藻丘(席):发育在滨浅湖亚相内,在清水、富氧环境中。在水动力条件相对较强条件下发育藻团块灰/云岩、藻叠层灰/云岩、生屑灰/云岩,形成藻丘;在水动力条件相对较弱条件下发育藻纹层灰/云岩、藻泥晶灰/云岩,形成藻席。盆地内西岔沟剖面E₃²发育藻丘沉积(图6),单个藻丘的长度为2.5 m,宽度为1.5 m,高度为1.7 m,藻丘之间为泥晶灰/云岩、灰质泥岩沉积;纵向自下向上的沉积序列依次为扇三角洲前缘亚相水下分流河道微相,岩性为灰色、棕灰色砾岩、砂砾岩、细砂岩—粉砂岩,见槽状交错层理、交错层理、冲刷面,向上变为滨浅湖亚相沉积,底部岩性为反粒序的砂岩—砾状砂岩,向上变为鲕粒灰/云岩、细砂岩,顶部为藻团块灰/云岩(图7)。

颗粒滩:发育在滨浅湖亚相内,水体较浅,水动力条件相对较强,岩性为颗粒灰/云岩。盆地内西岔沟剖面N₂¹发育藻丘—颗粒滩沉积(图8),藻丘发育

在颗粒滩上,藻丘的高度为2.5~4.2 m,藻丘间为泥晶灰/云岩,颗粒滩岩性为鲕粒灰/云岩,厚度为0.5~1.5 m,横向分布相对较稳定。



图6 柴达木盆地西岔沟剖面E₃²藻丘典型照片

Fig.6 Typical photograph of E₃² algal dunes from Xichagou outcrop in Qaidam Basin

灰/云坪:发育在滨浅湖亚相内,水体较深,水动力条件相对较弱,岩性为泥晶灰/云岩。

3.2 碳酸盐岩发育模式

根据柴达木盆地野外露头、钻井取芯资料、测井资料及区域地质资料等综合分析,碳酸盐岩发育4种沉积组合样式,即颗粒滩—灰/云坪、颗粒滩(鲕粒滩)—藻丘、藻席—灰/云坪、颗粒滩—藻丘(席)—灰/

云坪 4 种组合样式。

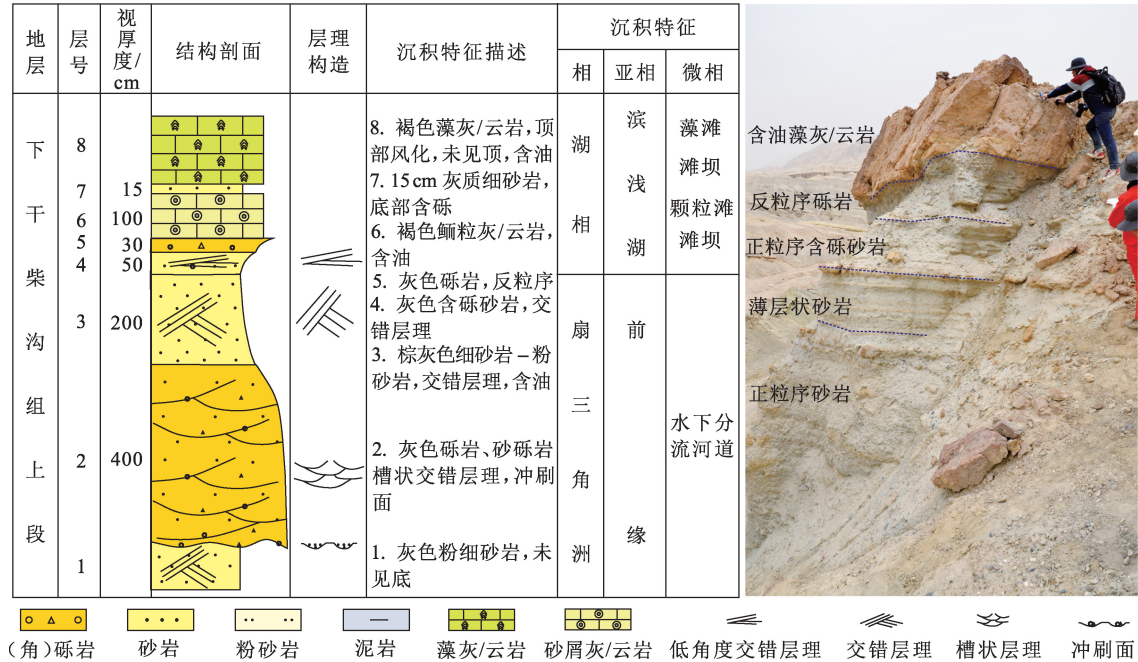


图 7 柴达木盆地西岔沟剖面 E₃² 藻丘沉积序列

Fig. 7 Sequence diagram of E₃² algal dunes at Xichagou section of Qaidam Basin

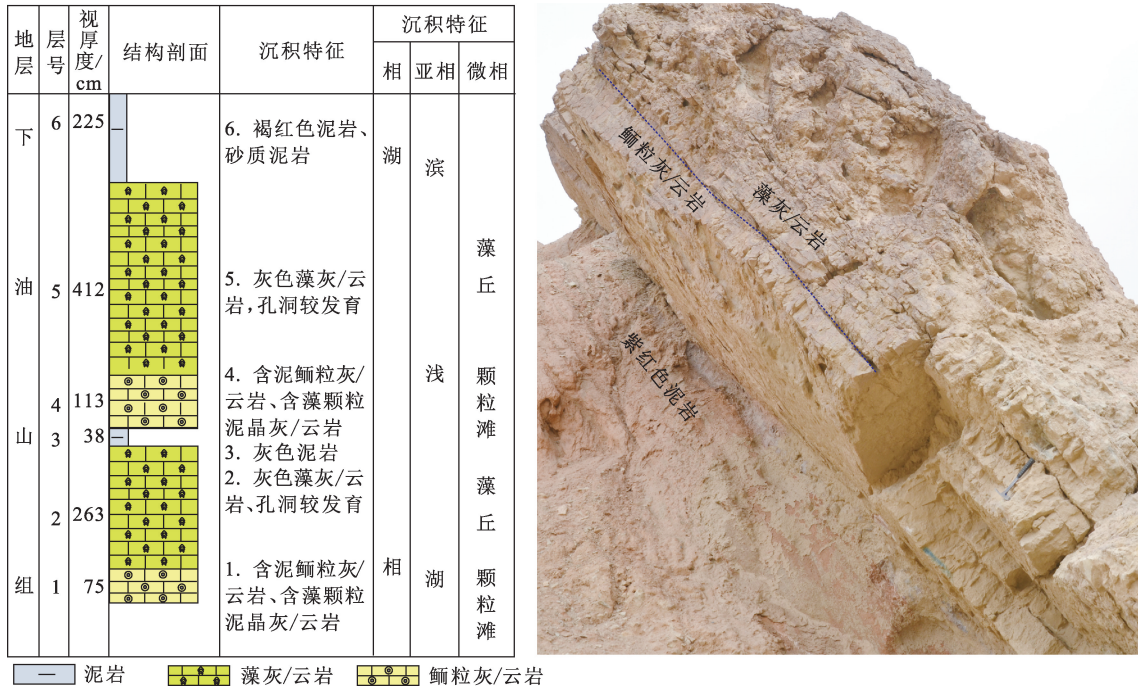


图 8 柴达木盆地西岔沟剖面 N₂¹ 藻丘-颗粒滩沉积序列

Fig. 8 Sequence diagram of N₂¹ algal and granular beach in Xichagou section of Qaidam Basin

颗粒滩-灰/云坪组合样式: 发育于英西地区 E₃² 地层中, 主要发育在盆地洼陷区, 局部地区形成古低隆起, 在低隆起的顶部发育颗粒滩微相 (岩性主要为砾屑灰/云岩、砂屑灰/云岩、粉屑灰/云岩), 在其侧缘发育灰/云坪微相 (岩性主要为泥晶灰/云

岩), 发育模式见图 9。
颗粒滩 (鲕粒滩) - 藻丘碳酸盐岩沉积组合样式: 见于西岔沟剖面 N₂¹ 地层中, 主要发育于盆地斜坡区的滨浅湖沉积背景, 在鲕粒滩微相 (岩性主要为鲕粒灰/云岩) 之间的洼地发育藻丘微相 (岩性主

要为藻团块灰/云岩),发育模式见图 10。

藻丘/席-灰/云坪碳酸盐岩沉积组合样式:见于西岔沟剖面 E_3^2 地层中,发育于湖盆边缘,在高能环境中发育混积颗粒滩,在陆源碎屑物供给不充分时,在低能环境中发育藻席(丘)。纵向上自下而上依次为扇三角洲水分流河道微相(岩性为砂砾岩、砾状砂岩)、滨浅湖滩坝微相(岩性为含鲕粒砂岩、砾状砂岩)、藻席(岩性为藻团块灰/云岩、含碎屑藻鲕灰/云岩);横向上从盆缘向湖盆中心依次为藻

席、灰/云坪(岩性为泥晶灰/云岩、泥灰岩),发育模式见图 11。

颗粒滩-藻丘(席)-灰/云坪组合样式:发育于尕斯-跃进 E_3^2 、南翼山 N_2 等地层中,主要发育于宽缓斜坡区的古隆起上,陆源碎屑供给不充分,在隆起的顶部发育藻丘(席)微相(岩性主要为藻灰/云岩类),在其向陆一侧发育颗粒滩微相(岩性主要为颗粒灰/云岩),在其向盆一侧发育灰/云坪微相(岩性主要为泥晶灰/云岩),发育模式见图 12。

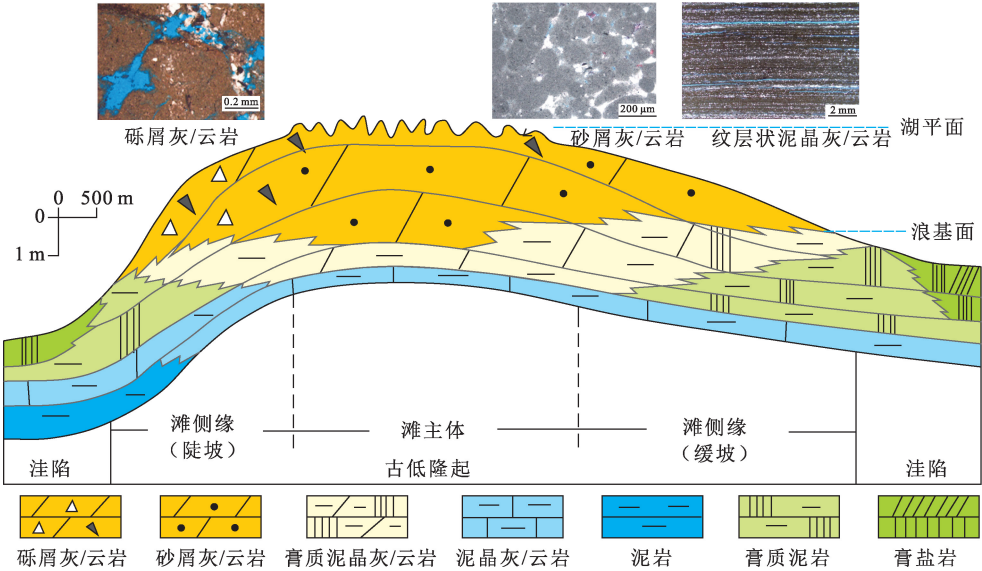


图 9 颗粒滩-灰/云坪碳酸盐岩发育模式

Fig. 9 Development pattern of carbonate rocks in granule beach ash/Yunping Plateau

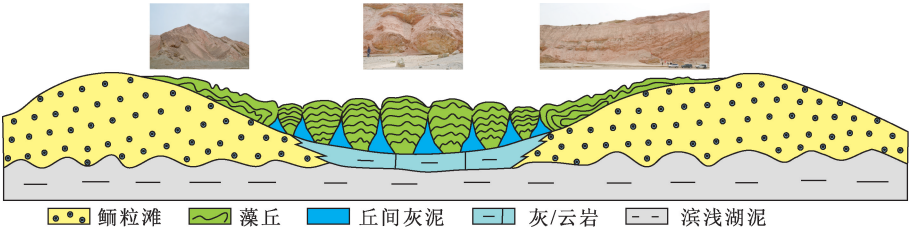


图 10 颗粒滩(鲕粒滩)-藻丘碳酸盐岩发育模式

Fig. 10 Development pattern of granular Beach (oolitic beach)-algal dune carbonate rock

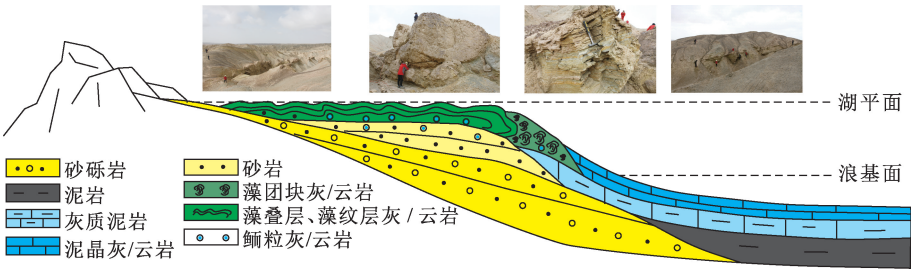


图 11 藻席-灰/云坪碳酸盐岩发育模式

Fig. 11 Development pattern of algal dust ash/Yunping carbonate

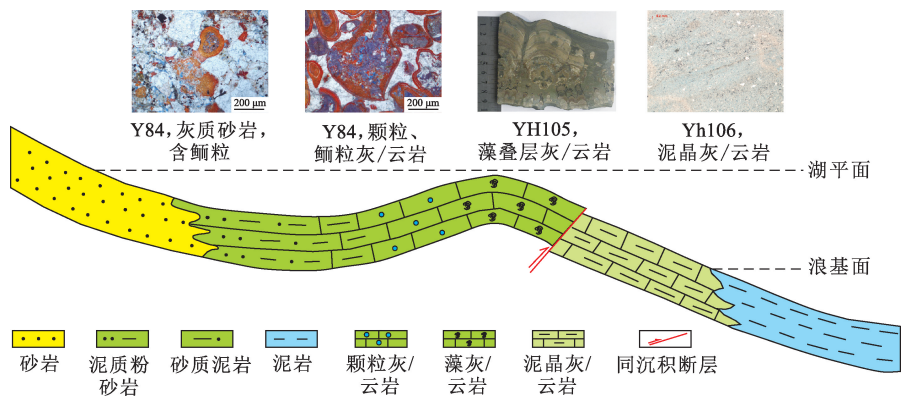


图 12 颗粒滩-藻丘(席)-灰/云坪碳酸盐岩发育模式

Fig. 12 Development pattern of carbonate rocks in granular beach algal mound (MAT)-ash/Yunping

3.3 碳酸盐岩沉积特征

柴达木盆地新生代在咸化湖盆水体、隆-洼相间的古地形、频繁湖平面升降变化、差异性碎屑物供给等因素综合控制下,碳酸盐岩分布具有纵向层系多、横向上迁移发育、平面叠合连片分布等特征。

碳酸盐岩随沉积中心变化具有迁移特征(图

13);主要分布于滨浅湖亚相中,下干柴沟组(E_3)、上干柴沟组(N_1)时期主要分布在柴西南区的跃进、尕斯、花土沟、狮子沟地区;下油砂山组(N_2^1)、上油砂山组(N_2^2)时期随着沉积中心向东、向北迁移,碳酸盐岩迁移到柴西北区的小梁山、南翼山、大风山等地区。

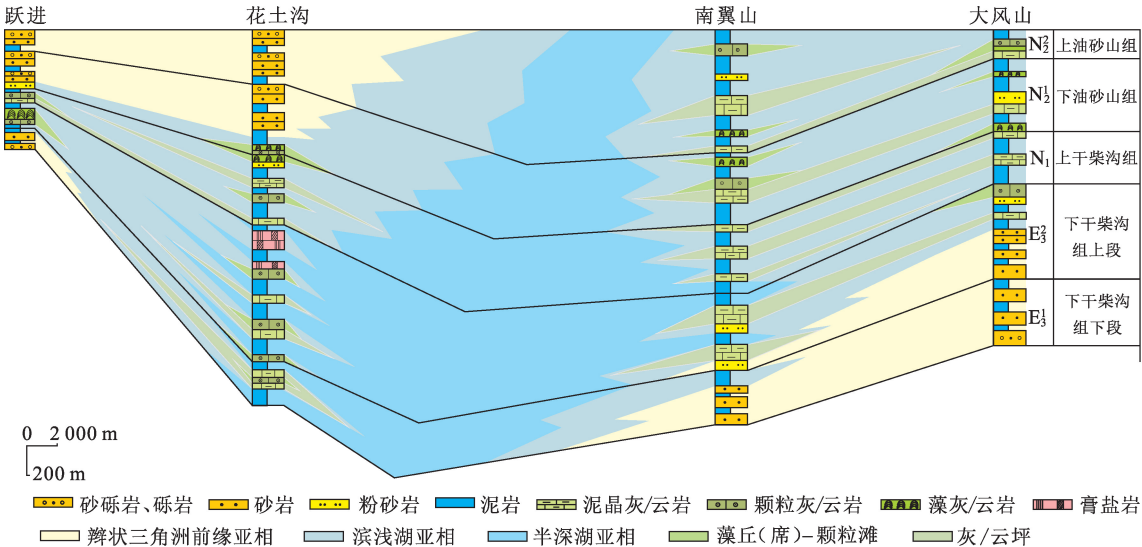


图 13 柴西地区跃进-大风山地区碳酸盐岩分布对比

Fig. 13 Comparison of carbonate distribution in Yuejin and Dafengshan area of western Qaidam Basin

碳酸盐岩的分布受到古地貌沉积背景控制(图 14),在盆地斜坡区,在陆源碎屑供给欠补偿时期,在局部古隆起部位发育藻丘(席)沉积,在斜坡部位发育灰/云岩坪;在碎屑供给时期,则发育碳酸盐岩颗粒滩-碎屑岩滩坝沉积;在盆地内洼中古低隆起区,湖浪波及区为颗粒滩-块状灰/云坪沉积,未波及区为纹层状灰/云坪沉积。

结合沉积背景、古地貌特征、露头及钻井取芯资料,编制了柴达木盆地新生代碳酸盐岩沉积概略图

(图 15),该图为多层系叠合图,仅整体反映沉积岩相的分布特征)。在山前带盆缘区发育辫状河三角洲相、扇三角洲相,在盆内大面积发育湖泊相,而碳酸盐岩主要分布在盆地的西部地区(简称柴西地区)。另外,从不同类型碳酸盐岩分布来看,灰/云坪分布范围较广,呈现出大面积、叠合连片的分布特征,藻丘(席)-颗粒滩(为了便于叙述,将两种类型微相合并)分布范围局限,呈现出局部富集的分布特征。

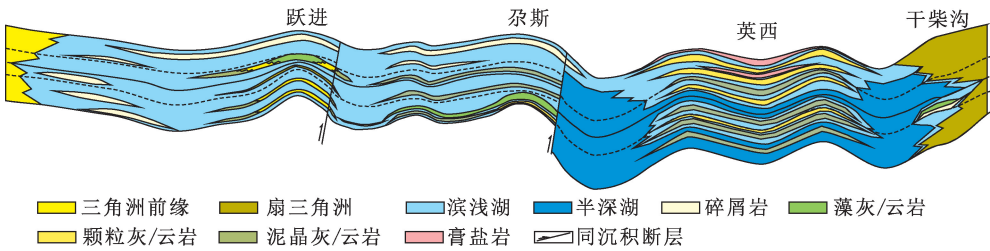


图 14 柴达木盆地不同古地貌背景下碳酸盐岩分布

Fig. 14 Distribution of carbonate rocks in different Paleogene settings of in Qaidam Basin

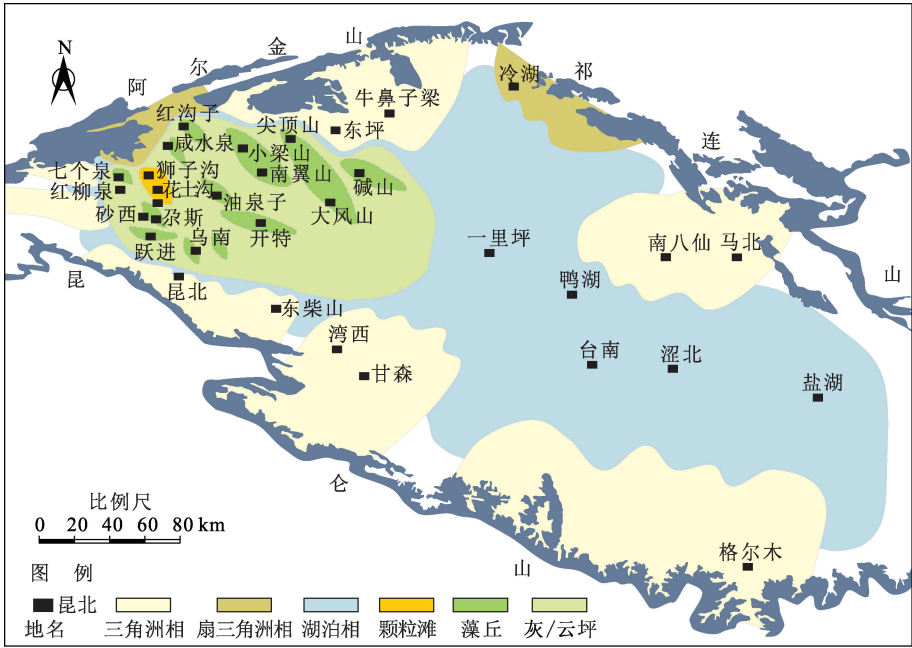


图 15 柴达木盆地新生代碳酸盐岩平面分布

Fig. 15 Plane distribution of Cenozoic carbonate rocks in Qaidam Basin

4 结 论

(1)柴达木盆地新生代发育两种成因类型碳酸盐岩储层,即生物成因和机械-化学复合成因。生物成因碳酸盐岩为藻灰/云岩类;机械-化学复合成因碳酸盐岩为颗粒灰/云岩类和泥晶灰/云岩。

(2)柴达木盆地碳酸盐岩发育颗粒滩-灰/云坪、颗粒滩(鲕粒滩)-藻丘、藻席-灰/云坪、颗粒滩-藻丘(席)-灰/云坪 4 种类型组合样式;灰/云坪储层在柴达木盆地西部地区大面积分布,颗粒滩储层分布水体较浅、水动力条件相对较强的滨浅湖亚相带,藻丘(席)分布在滨浅湖亚相内的清水、富氧环境中。

参考文献:

[1] 陈能贵,王艳清,徐峰,等. 柴达木盆地新生界湖盆咸化特征及沉积响应[J]. 古地理学报,2015,17(3):371-380.

CHEN Nenggui, WANG Yanqing, XU Feng, et al. Palaeo-salinity and its sedimentary response to the Cenozoic salt water lacustrine deposition in Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(3): 371-380.

[2] 赵加凡,陈小宏,金龙. 柴达木盆地第三纪盐湖沉积环境分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 342-346.

ZHAO Jiafan, CHEN Xiaohong, JIN Long. Application of stable isotope in Tertiary saline lake of Qaidamu Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2016, 35(3): 342-346.

[3] 赵加凡,陈小宏,杜业波. 柴达木盆地第三纪湖盆演化史[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 41-44.

ZHAO Jiafan, CHEN Xiaohong, DU Yebo. The Tertiary sedimentary evolution of Qaidam Basin, Northwest China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 41-44.

[4] 党玉琪,尹成明,赵东升. 柴达木盆地西部地区古近纪与新近纪沉积相[J]. 古地理学报, 2004, 6(3): 297-306.

- DANG Yuqi, YIN Chengming, ZHAO Dongsheng. Sedimentary facies of the Paleogene and Neogene in Western Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(3): 297-306.
- [5] 王艳清, 刘云田, 黄革萍, 等. 柴达木盆地西部地区古近—新近系沉积体系与油气分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 51-158.
- [6] 黄成刚, 袁剑英, 田光荣, 等. 柴西地区始新统湖相白云岩储层地球化学特征及形成机理[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京)), 2016, 23(3): 230-242.
- HUANG Chenggang, YUAN Jianying, TIAN Guangrong, et al. The geochemical characteristics and formation mechanism of the Eocene lacustrine dolomite reservoirs in the Western Qaidam[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences(Beijing)), 2016, 23(3): 230-242.
- [7] 张敏, 尹成明, 寿建峰, 等. 柴达木盆地西部地区古近系及新近系碳酸盐岩沉积相[J]. 古地理学报, 2004, 6(4): 391-400.
- ZHANG Ming, YIN Chengming, SHOU Jianfeng, et al. Sedimentary facies of carbonate rocks of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(4): 391-400.
- [8] 夏志远, 刘占国, 李森明, 等. 岩盐成因与发育模式: 以柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组为例[J]. 石油学报, 2017, 38(1): 55-66.
- XIA Zhiyuan, LIU Zhanguo, LI Senming, et al. Origin and developing model of rock salt: a case study of Lower Ganchaigou, Formation of Paleogene in the west of Yingxiong ridge, Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 55-66.
- [9] TUCKER M E, WRIGHE V P, DICKSON J A D. Carbonate sedimentology[M]. London: Blackwell Scientific, 1990: 314-365.
- [10] BOSENCE D W J, GIBBONS K A, HERON D P L, et al. Microbial Carbonates in space and time: implications for global exploration and production[J]. Geological Society London Special Publications, 2015, 418(1): 1-15.
- [11] 周瑶琪, 张晗, 张振凯. 海相碳酸盐鲕粒形成过程的模拟实验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): 23-30.
- ZHOU Yaoqi, ZHANG Han, ZHANG Zhenkai. Experiment study of synthesis for marine carbonate ooids genesis[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017, 41(3): 23-30.
- [12] BAHNIUK A M, ANJOS S, FRANÇA A B, et al. Development of microbial carbonates in the Lower Cretaceous Codó Formation (north-east Brazil): implications for interpretation of microbialite facies associations and palaeoenvironmental conditions [J]. Sedimentology, 2015, 62(1): 155-181.
- [13] 罗平, 王石, 李朋威, 等. 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 807-822.
- LUO Ping, WANG Shi, LI Pengwei, et al. Review and prospectives of microbial carbonate reservoirs[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 807-822.
- [14] 余敏, 胡安平, 王鑫, 等. 湖相叠层石生排烃模拟及微生物碳酸盐岩生烃潜力[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 12-22.
- SHE Min, HU Anping, WANG Xin, et al. Thermocompression simulation of hydrocarbon generation and expulsion for lacustrine stromatolite and hydrocarbon generation potential of microbial carbonates[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2019, 43(1): 12-22.
- [15] 周自立, 杜韞华. 湖相碳酸盐岩与油气分布关系: 以山东胜利油田下第三系为例[J]. 石油实验地质, 1986, 8(2): 123-132.
- ZHOU Zili, DU Yunhua. Relationship between Lacustrine carbonates and oil and gas distribution: take the third department of Shandong Shengli Oilfield as an example [J]. Experimental Petroleum Geology, 1986, 8(2): 123-132.
- [16] 钱凯, 杜韞华, 周书欣, 等. 中国湖泊碳酸盐岩[G]//冯增昭, 王英华, 等. 中国沉积学. 北京: 石油工业出版社, 1994: 15-179.
- [17] 王夕宾, 郝延征, 姚军, 等. 东营凹陷沙一段薄层湖相碳酸盐岩成因研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 27-34.
- WANG Xibin, HAO Yanzheng, YAO Jun, et al. Genetic research of flaggy lacustrine carbonate in the first Member of Shahejie Formation, Dongying Depression [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016, 40(1): 27-34.
- [18] 寿建峰, 绍文斌, 陈子焯, 等. 柴西地区第三系藻灰(云)岩的岩石类型和分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 37-39.
- SHOU Jianfeng, SHAO Wenbin, CHEN Ziliao, et al. Lithological types and distribution features of Tertiary algal-limestone in Chaixi area, Qaidam Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(4): 37-39.
- [19] 周露, 杨东兴, 张连平, 等. 花土沟油田藻灰/云岩储层特征与油气关系[J]. 特种油气藏, 2010, 17(2): 60-62.

- ZHOU Lu, YANG Dongxing, ZHANG Lianping, et al. Relationship between algal limestone reservoir characteristics and petroleum in Huagou Oilfield and its implication for petroleum[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2010,17(2):60-62.
- [20] 唐丽,张晓宝,龙国徽,等. 湖相碳酸盐岩油气藏特征及成藏分析:以柴达木盆地南翼山油气藏为例[J]. 天然气地球科学,2013,34(3):591-598.
- TANG Li, ZHANG Xiaobao, LONG Guohui, et al. Pool features and hydrocarbon accumulation analysis of lacustrine carbonate rock: take Nanyishan Reservoir in Qaidam Basin as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2013,34(3):591-598.
- [21] 孙岩,沈安江,徐洋,等. 柴达木盆地跃进地区下干柴沟组上段藻丘灰岩储层特征[J]. 沉积学报,2002,20(1):61-69.
- SUN Yan, SHEN Anjiang, XU Yang, et al. A research on E_3^2 algal-reef reservoir in Yuejin Area, Qaidam Basin, Northwestern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002,20(1):61-69.
- [22] 常华进,储雪蕾,冯连郡,等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质评论,2009,55(1):91-99.
- CHANG Huajin, CHU Xuelei, FENG Lianjun, et al. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies[J]. Geological Review, 2009,55(1):91-99.
- [23] 谭红兵,于升松. 我国湖相沉积环境演化研究中元素地球化学的应用现状及发展方向[J]. 盐湖研究,1999,7(3):1-8.
- TAN Hongbing, YU Shengsong. Present situation and future development of elemental geochemistry in the study of lake sediments' evolution[J]. Journal of Salt Lake Research, 1999,7(3):1-8.
- [24] 刘刚,周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用[J]. 石油实验地质,2007,29(3):307-314.
- LIU Gang, ZHOU Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: taking Qianjiang formation in the Jiangnan Basin as an example[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2007,29(3):307-314.
- [25] 许淑梅,张晓东,翟世奎,等. 海洋环境中氧化还原敏感性微量元素的地球化学行为及环境指示意义[J]. 海洋地质动态,2007,23(3):11-18.
- XU Shumei, ZHANG Xiaodong, ZHAI Shikui, et al. Geochemical behavior and environmental significance of redox-sensitive trace elements in the marine environment [J]. Marine Geology Letters, 2007,23(3):11-18.
- [26] BURNE R V, MOORE L S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic communities [J]. Palaios, 1987,2:241-254.
- [27] RIDING R. Classification of microbial carbonates [M]// RIDING R. Calcareous algae and stromatolites. Berlin: Springer-Verlag,1991: 21-51.
- [28] AHR W M. Paleoenvironment, fossil algae and algal structures in the upper Cambrian of Texas[J]. Journal of Sedimentary Petrology,1971,41:205-216.

(编辑 修荣荣)

含油气盆地露头砂岩样品定向流体包裹体薄片 制作方法及其意义

王鑫涛, 陈 勇, 周瑶琪, 周腾飞

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

摘要:制备高质量的定向流体包裹体薄片是从“构造-成岩”角度入手深入研究含油气盆地砂岩储层中构造裂缝属性的关键与前提。建立一种针对含油气盆地露头砂岩样品的定向流体包裹体薄片的制作方法。以有效保留露头砂岩样品的原始方向信息作为贯穿整个制片过程的主旨,体现在野外砂岩样品的定向采集、砂岩样品原始产状的恢复、样品切割方向的标定、首次切样、粘样以及在载玻片上标定样品的方向等多个制片环节中,以确保砂岩样品的方向信息在制作的流体包裹体薄片中得到准确呈现。结果表明:利用该方法制备的薄片兼有定向薄片和流体包裹体薄片的双重功能,不仅可为砂岩中流体包裹体岩相学观察的顺利进行提供保障,还可为样品中脉体和流体包裹体面的原始方位信息的准确恢复以及后续相关流体地球化学测试分析奠定强有力的薄片基础,以便为从“构造-成岩”角度入手深化认识砂岩储层中构造裂缝特征及其相关油气成藏过程的定量化研究提供服务。

关键词:定向流体包裹体薄片; 制片方法; 露头砂岩样品; 流体包裹体面; 构造-成岩; 储层构造裂缝

中图分类号:P 579 **文献标志码:**A

引用格式:王鑫涛,陈勇,周瑶琪,等. 含油气盆地露头砂岩样品定向流体包裹体薄片制作方法及其意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 14-24.

WANG Xintao, CHEN Yong, ZHOU Yaoqi, et al. Oriented thick section preparation of sandstone samples from outcrop for fluid inclusion analysis in hydrocarbon-bearing basin and its significance[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(1): 14-24.

Oriented thick section preparation of sandstone samples from outcrop for fluid inclusion analysis in hydrocarbon-bearing basin and its significance

WANG Xintao, CHEN Yong, ZHOU Yaoqi, ZHOU Tengfei

(School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The preparation of high-quality oriented fluid inclusion thick sections is the key and precondition to do in-depth study of attributes of structural fractures in sandstone reservoirs in hydrocarbon-bearing basins from the perspective of structural diagenesis. As such, this paper proposes a preparation method on oriented thick sections of fluid inclusions in sandstone samples from outcrop in hydrocarbon-bearing basin. In order to make sure the oriented fluid inclusion thick sections keep orientation information of sandstones correctly, preserving original orientation information of sandstone samples from outcrop effectively is the main theme throughout the whole processes of thick section preparation, which is concretely embodied in the following steps, including: collecting oriented sandstones from outcrop, reconstructing original orientation of sandstone sample, marking cutting lines on sample, first-cutting, mounting, marking orientation of sample on slide, and so on. The thick sections prepared by the method proposed in this paper, possess dual functions of oriented thin section and fluid inclusion

收稿日期:2019-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(U1762108,41873070);山东省重大创新工程项目(2017CXGC1602,2017CXGC1608);中央高校基本科研业务费专项(16CX06041A)

作者简介:王鑫涛(1989-),男,博士研究生,研究方向为含油气盆地流体地球化学、构造-成岩作用和油气成藏机制等。E-mail: xintaowang@s.upc.edu.cn.

通信作者:陈勇(1976-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为含油气盆地流体分析和油气成藏机制等。E-mail: yongchenzy@upc.edu.cn.

thick section, which can guarantee petrographic observation of fluid inclusions trapped in sandstones, and can also lay the foundations for the accurate reconstructions of original orientations of veins and fluid inclusion planes in samples and for the follow-up analyses on fluid geochemistry. Therefore, the oriented thick sections of fluid inclusions in sandstones from outcrop prepared by this method are helpful to better understand the structural fracture attributes in terms of structural diagenesis, and to improve the quantitative researches of hydrocarbon accumulation processes related to fractures in sandstone reservoirs.

Keywords: oriented fluid inclusion thick section; preparation method; sandstone samples of outcrop; fluid inclusion planes; structural diagenesis; structural fractures in reservoirs

含油气盆地构造裂缝研究一直是石油地质学研究领域的热点问题之一(下文所述裂缝均指构造裂缝)。近年来,地质学家不断地认识到在流体和流体参与下发生的水-岩化学作用(胶结、溶解等)对裂缝的形成和演化具有重要的影响^[1-2],并逐渐形成了在对裂缝几何学、运动学、动力学分析的基础上,加强与裂缝相关水-岩化学作用研究的格局,即从“构造-成岩”角度入手深入剖析裂缝的成因、形成环境、分布与发育规律等裂缝属性^[3-4]。充填成岩胶结物的裂缝(脉体)和流体包裹体面(Fluid Inclusion Planes, FIP)是开展上述研究的重要分析对象。其中对蕴含构造和流体双重信息的FIP进行系统分析,是从显微角度研究裂缝相关水-岩化学作用的有效方法。然而能否有效地制备定向流体包裹体薄片是基于脉体和FIP深化认识储层裂缝及其相关水-岩化学作用的关键与前提,也是本领域技术人员亟待解决的技术难题。野外露头是储层裂缝研究的天然“实验室”,而砂岩储层裂缝,尤其致密砂岩储层裂缝的研究是目前油气储层研究的重点与难点领域之一^[5]。因此研究并建立一种含油气盆地露头砂岩样品定向流体包裹体薄片的制作方法,既能有效地保留样品在野外露头的原始方向信息,又可以完整地保存样品中脉体和FIP内的流体信息。该方法可以弥补现有相关制片技术的不足,为从“构造-成岩”角度入手来系统地认识砂岩储层裂缝的属性提供保障。

1 定向流体包裹体薄片在含油气盆地砂岩储层裂缝研究中的重要性

流体包裹体分析是揭示地壳流体信息的一种直接而有效的研究手段。在含油气盆地研究中,捕获于成岩胶结物(硅质、钙质等)中的流体包裹体被广泛地应用于储层成岩流体演化恢复(图1(a)~(d))^[6-7],而捕获于矿物颗粒内部(图1(f)、(h))、脉体胶结物(图1(j))和显微FIP(图1(k))中等呈现不同产出状态的烃类包裹体及与其伴生的同期盐水包裹体是开展半定量-量化油气成藏过程研究

的直接样品,其中包括油气成藏期次与时间的确定^[8-9],油气成藏动力学(温度场、压力场和流体场)特征重建^[10-11],油气运移方向和有利聚集区带预测^[11-12]等方面。

在涉及砂岩储层裂缝及其水-岩化学作用研究和以构造裂缝为主控因素的油气成藏过程分析时,捕获流体包裹体的脉体样品(图1(i)、(j))和发育在矿物颗粒中的FIP(图1(k)、(l))是进行上述研究的有效地质样品。FIP是指组成岩石的矿物颗粒因受到构造运动的影响而产生大量的变形结构和显微裂隙,随后在愈合过程中捕获地壳流体(油、气、水等)而形成的赋存于矿物颗粒微裂隙中呈线状排列的流体包裹体组合^[13]。这是联系构造事件与流体演化的纽带,一方面通过对岩石中FIP的优势定向方位进行分析,可以获得与特定流体活动有关的构造应力场特征;另一方面通过对FIP中的包裹体进行研究,可以获得与特定的构造应力场对应的古流体性质(温度、压力、成分)和流体来源等方面的信息^[14-15]。FIP的准确分析对裂缝及其相关水-岩化学作用研究具有非常重要的意义。

目前国内外对FIP的研究多局限于在岩浆岩(如花岗岩)体系中的应用^[16-18],而其在沉积盆地及储层裂缝研究中的系统应用却鲜有涉及,即使有相关研究也多是基于未定向的流体包裹体薄片,对其中的FIP特征进行常规的岩相学观察并选取特定的包裹体进行后续的流体地球化学测试分析。这种缺乏方向性的FIP研究仅侧重于与裂缝相关的地壳流体研究,忽视了FIP所具有的构造属性,不能很好地诠释构造裂缝与地壳流体的相互作用,甚至会得出错误的研究结论。

因此如何有效地制作定向流体包裹体薄片,使脉体样品和储层FIP同时赋有流体和原始地质方向的双重信息,对于深入开展储层裂缝研究至关重要。以砂岩储层FIP研究为例,建立在以定向流体包裹体薄片分析为基础的FIP研究,首先通过岩相学和显微荧光观察,如图2所示,依据FIP的穿插切割关系、优势展布方位及其中包裹体的形态、大小、颜色、

相态、含烃与否等特征可对储层 FIP 的发育期次进行划分。尤其因定向流体包裹体薄片含有方向信息,可通过费氏台准确地测定各期次 FIP 的定向方位,这是区别于未定向流体包裹体薄片的优势。在此基础上对各期次 FIP 中的包裹体进行均一温度、冰点、显微荧光/红外光谱、激光拉曼光谱、激光共聚焦显微镜等一系列相关地球化学测试分析及 PVT 模拟,并结合地质背景解剖,可有效地应用于以下地质问题的研究:①明确砂岩储层裂缝的发育期次与形成时间,确定储层所经历的构造活动期次并恢复

构造应力场方向特征;②依据各期次 FIP 的密度统计数据,定性地分析不同期次构造活动的强度;③明确与各期次裂缝形成和演化阶段有关的流体特征,包括流体的成分、温度、压力和盐度等相关物理化学性质;④确定与主要烃类流体活动期对应的构造活动,分析各期次裂缝对油气成藏的贡献作用;⑤当裂缝作为油气的主要输导体系时,通过对不同期次含烃流体的 FIP 的方向进行统计分析,可以精细地刻画不同期次油气在三维空间上的运移路径,进而为圈定油气的有利聚集区带提供可靠的依据。

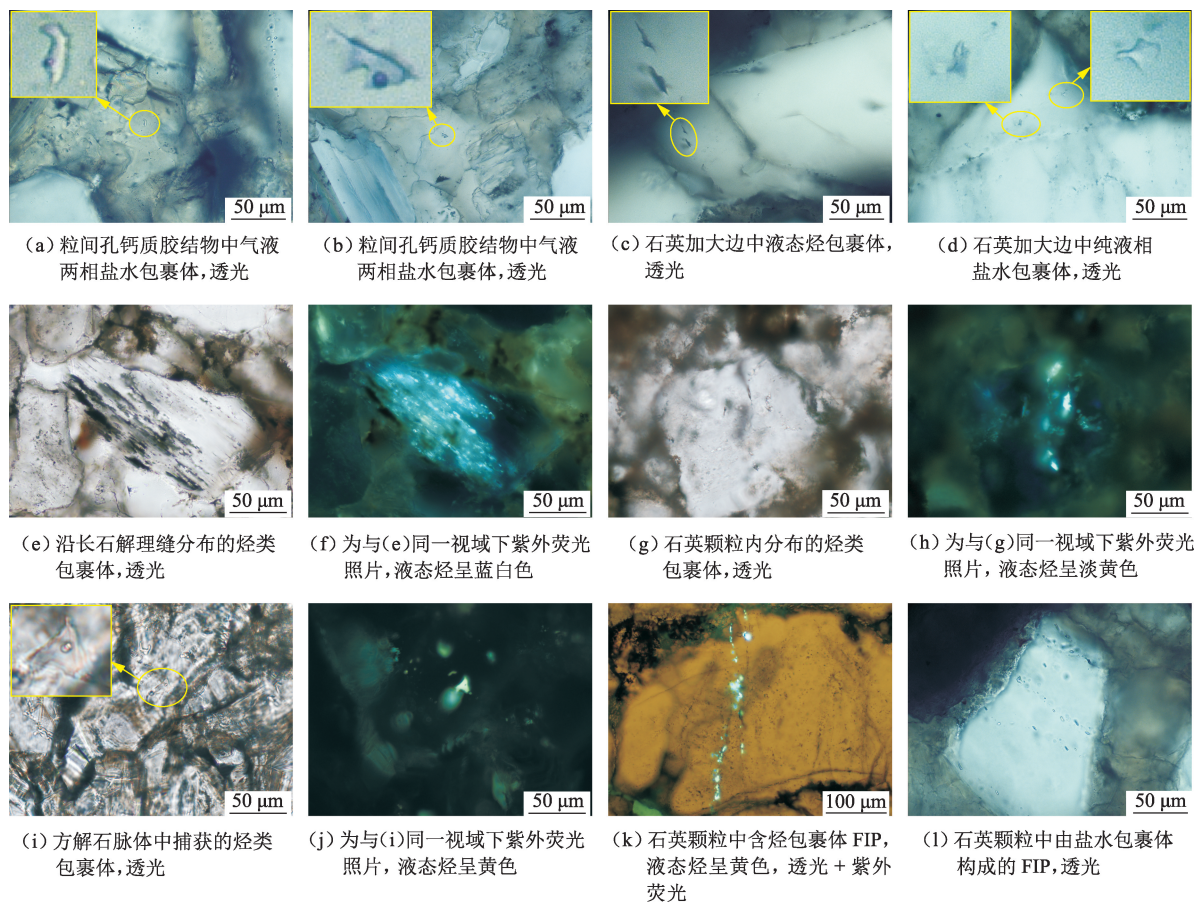


图1 含油气盆地砂岩储层中呈不同产出状态的各种类型的流体包裹体

Fig.1 Various fluid inclusions with different occurrences in sandstone reservoirs of hydrocarbon-bearing basins

包含有流体和原始地质方向双重信息的定向流体包裹体薄片,是从“构造-成岩”角度入手深化认识砂岩储层裂缝及其相关水-岩化学作用特征的基础与前提,同时也可极大地提高与构造裂缝控藏过程相关地质问题研究的精细化程度,并为开辟 FIP 在含油气盆地研究中的定量化应用的新局面创造先决条件。而上述研究又建立在如何有效地制作砂岩样品定向流体包裹体薄片之上,研究重点阐述以野外露头砂岩为样品的定向流体包裹体薄片的制作方法。

2 制片方法的基本原理

为填补现有相关制片技术的不足,以促进砂岩储层裂缝及其水-岩化学作用特征研究,研究提出一种含油气盆地露头砂岩样品定向流体包裹体薄片的制作方法,其基本原理如下。

整个制片过程主要包括定向采集露头砂岩样品并进行原始产状恢复,标定切割方向,根据切割方向进行首次切割得到制片样品块,对制片样品块的水平面进行粗、细、精磨和抛光,粘片,在粘接的载玻片