

准噶尔盆地腹部永进地区砂岩储层中碳酸盐胶结物特征及其成因意义

王芙蓉^{1,2}, 何生^{1,3}, 何治亮^{2,4}, 杨智^{1,2}, 武恒志^{2,5}, 孟闲龙^{2,4}

- (1. 中国地质大学 资源学院 石油系, 湖北 武汉 430074; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院西部分院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074; 4. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 5. 中国石化 西南油气分公司, 四川 成都 610051)

摘要: 准噶尔盆地腹部永进地区不整合面附近砂岩储层中次生孔隙和碳酸盐胶结物相对发育。通过薄片观察、阴极发光、扫描电镜/能谱分析, 认为碳酸盐胶结物是研究区砂岩最主要的胶结物成分, 其主要类型为(铁)方解石和铁白云石, 垂向上含量随深度增加而增加, 多集中分布在白垩系和侏罗系之间的不整合面之下约100 m的范围之内。碳、氧同位素分析以及泥岩中各元素测试结果表明, 大气淡水通过永进地区白垩系和侏罗系之间存在的角度不整合对其下伏地层物性作用不明显, 晚期含铁碳酸盐胶结物和孔隙发育主要与有机酸关系密切。在有机酸作用下, 早期发育的碳酸盐胶结物、长石碎屑颗粒以及粘土矿物为晚期碳酸盐胶结物的发育提供了物质基础, 而且溶解的物质在酸性流体作用下运移至不整合面附近重新沉淀, 造成高孔隙度和高含量碳酸盐胶结物在深度上具有重叠的特征。由于含铁碳酸盐胶结物形成时代晚而且储层未受到其他建设性成岩作用的明显改造, 晚期碳酸盐胶结物含量和面孔率呈互相补偿的关系, 表明了晚期碳酸盐胶结物对储层物性的破坏作用。

关键词: 坡缕石; 碳酸盐胶结物; 溶蚀作用; 次生孔隙; 有机酸; 不整合面; 永进地区; 准噶尔盆地腹部

中图分类号: TE122.2⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)02-0169-10

Characteristics and genetic mechanism of carbonate cement in sandstone reservoirs of Yongjin area in central Junggar Basin

WANG Fu-rong^{1,2}, HE Sheng^{1,3}, HE Zhi-liang^{2,4}, YANG Zhi^{1,2}, WU Heng-zhi^{2,5} and MENG Xian-long^{2,4}

- (1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. West China Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Urumqi 830011, China; 3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China; 5. Southwest Branch Company, SINOPEC, Chengdu 610051, China)

Abstract: Secondary pores and carbonate cements are quite well developed in sandstones near the unconformity between Jurassic and Cretaceous strata of Yongjin area in central Junggar Basin. Data obtained by thin-sections analysis, cathodoluminescence emission analysis and SEM/EDX show that carbonate cements seem to be the uppermost cements composed of ferroan sparry calcite and ankerite and are distributed mostly in the depth interval of 100 m below the unconformity, with their contents increasing with the depth. Carbon and oxygen isotope and elements determination in mudstone values indicate that atmospheric fresh water did not have a distinct effect on reservoir characters below the unconformity, but the development of carbonate cements and pores was closely related to the organic acid. With the action of the organic acid, early carbonates, feldspar and clay minerals provided materials for later carbonates, and the dissolved matters moved to the unconformity by acidic fluids and deposited again,

收稿日期: 2008-05-28; 修订日期: 2008-09-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40739904); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060491505); 中国石油化工集团公司“十一五”重点科技攻关项目(P05005); 中国地质大学(武汉)优秀青年教师资助计划资助项目(CUGQNL0840)

作者简介: 王芙蓉(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要从事储层沉积、成岩作用研究, E-mail: wfr777@163.com。

which led to the superimposition of high contents of porosity and carbonate cements at the depth. As the ferroan sparry carbonate cements were formed later and the sandstone reservoir was on the whole not subjected to any other constructive diagenesis, the development of carbonate cements must have played an apparent controlling effect on reservoir characteristics.

Key words: carbonate; cementation-dissolution; secondary porosity; organic acid; unconformity; Yongjin area; the central Junggar Basin

砂岩中碳酸盐胶结和溶解是影响储层物性的重要因素之一:一方面,它使原生孔隙大幅度减少,使储层物性受到损害;另一方面,它的出现可阻碍压实作用的进行,在合适条件下发生的溶解作用可将占据的孔隙空间释放出来(许书堂,2005)。所以在过去的30多年里,针对这一问题,许多学者从水-岩、有机-无机和砂岩-泥岩相互作用方面对碳酸盐的成因、沉淀和溶蚀反应等方面进行了大量的深入研究(Curtis,1978;Surdam *et al.*,1984,1989;Crossey *et al.*,1986;Bjørlykke,1994;Lynch,1996;张枝焕,2000;Jonk *et al.*,2005;曾溅辉,2005;聂逢君等,2005)。

准噶尔盆地腹部永进地区勘探目的层埋深一般在5 500~6 000 m左右,属于深埋储层;孔隙度在10%左右,渗透率在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,属于特低孔超低渗储层。深埋条件下储层成因机理问题已经成为制约准噶尔盆地油气勘探生产的瓶颈。前人对准噶尔盆地腹部侏罗系和白垩系储层孔隙进行过研究,认为孔隙类型以原生剩余粒间孔为主^①,也有研究认为孔隙类型以次生溶孔为主^②。研究区砂岩储层中碳酸盐胶结物发育,类型丰富,含量差异大,因此分析碳酸盐胶结物的特征有助于正确判断永进地区砂岩储层的孔隙类型,了解砂岩储层孔隙的演化史及其影响因素,进而正确评价储层的储集性能。

1 地质背景

永进地区位于准噶尔盆地腹部中石化登记的中部3区块,构造位置位于中央拗陷的昌吉凹陷西段,车莫古隆起南翼。该区位于盆地的油气源区,是当前西部新区中石化油气勘探的重要区域,埋深在5 800 m以下深度段中都有油气发现,目前已有钻井7口(图1),永1井、永2井在侏罗系西山窑组已试获工业油气流。腹部地区地层发育比较齐全,但是

受车莫古隆起的影响,侏罗系和上覆白垩系之间为区域性不整合接触(王离迟等,2005),上侏罗统的喀拉扎组 and 齐古组地层以及中侏罗统的头屯河组地层均被剥蚀(表1)。本次研究的砂岩储层包括侏罗系和白垩系,侏罗系主要是一套河流三角洲-湖泊沉积,白垩系为河流-湖泊相沉积。这两套地层中砂岩成分的岩屑含量高,成分成熟度较低,结构成熟度高。

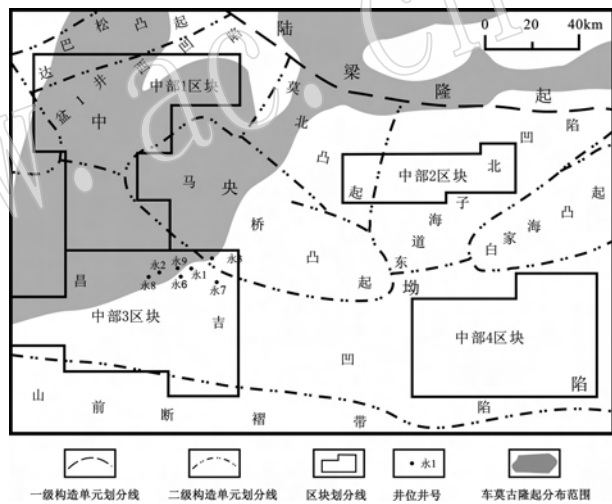


图1 准噶尔盆地腹部永进地区构造位置和钻井井位图
[据中石化勘探研究院(2006)修改]

Fig. 1 Map showing structural and logging locations of Yongjin area in central Junggar Basin(modified after SINOPEC Exploration and Production Research Institute, 2006)

2 样品采集与测试

选取了永进地区永1井、永2井、永3井、永6井、永7井和永8井这6口井深度约为5 500~6 200 m的砂岩样品进行了多种手段的测试(表2、表3、表4),这些砂岩多为岩屑砂岩,其次为长石岩屑砂岩。利用铸体薄片、阴极发光、扫描电镜/能谱进行碳酸盐胶结物类型和孔隙类型的判断,利用油层物性分

① 江苏油田分公司地质科学研究院,等. 2002. 准噶尔盆地中深层砂岩储层评价及预测.

② 杭州石油地质研究所,等. 2000. 准噶尔盆地莫索湾侏罗系-白垩系碎屑岩储层研究.

表1 永进地区中生代地层发育表
Table 1 Mesozoic strata of Yongjin area

系	统	地层	主要岩性
白垩系	上统	东沟组 K_2d	砖红、褐红色砂质泥岩、砂岩、砾岩互层
	下统	吐谷鲁群 K_1tg	灰绿、棕红色泥岩、砂岩组成不均匀互层,底部为灰绿色砂砾岩
侏罗系	上统	喀拉扎组 J_3k	地层缺失
		齐古组 J_3q	
	中统	头屯河组 J_2t	杂色泥岩、砂岩互层夹煤线和泥灰岩
		西山窑组 J_2x	上部以灰、灰绿、灰褐色泥岩为主,下部灰、灰绿色砂岩较发育,夹煤层
	下统	三工河组 J_1s	顶部为厚层灰色泥岩,中上部为大套块状灰色砂岩、泥岩,下部为砂岩、砾状砂岩、砂砾岩和泥岩,夹煤线
八道湾组 J_1b		上部为厚层状砂岩夹泥岩和煤层,中部为一套深灰泥岩,下部为厚层砂岩、砾状砂岩、砂砾岩夹煤层和泥岩	

析和薄片进行碳酸盐胶结物含量和孔隙度测定,结合碳、氧同位素分析和不整合面附近泥岩的化学元素分析可以确定碳酸盐胶结物成因和孔隙形成机理。

常规岩石薄片和铸体薄片分析在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心和中国石化胜利油田地质研究院测试中心的 MIAS 2000 型显微镜上完成,检测的室内温度为 25℃,相对湿度为 60%。

阴极发光分析在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心的 CL8200 MK5 型阴极发光仪上完成,检测的室内温度为 27℃,相对湿度为 40%。

扫描电镜/能谱分析在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心的 SEM-XL30 和 EDX-INCA 扫描仪上完成,检测的室内温度为 22℃,相对湿度为 60%。

碳、氧同位素分析由中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心进行稳定同位素样品的制备和测定,所用仪器为德国 Firnigan 公司 MAT253 型气体同位素质谱仪,检测的样品盘温度为 72℃,色谱温度为 40℃,He 气压力为 100 kPa。

泥岩元素分析在南京地质矿产研究所实验测试中心的 ICP-AES JY Ultima 2C 型光谱仪上完成,检测的室内温度为 23℃,相对湿度为 65%。

表2 永进地区砂岩中碳酸盐胶结物成分能谱分析统计表
Table 2 EDX analyses of carbonate cements in sandstone of Yongjin area

$w_B/\%$

井位	深度/m	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	定名
永1井	5 820.73	1.27	0.80	3.28	8.88	81.56	1.36	2.85		含铁方解石
	5 827.70				5.53	90.97	2.26	1.24		方解石
	6 117.38			2.22	5.54	82.59	4.31	5.35		方解石
永2井	5 953.66				7.41	91.31		1.28		方解石
	5 970.53		17.48		5.55	47.38	4.43	25.16		铁白云石
	6 001.23		19.00		6.79	63.28	6.41	4.52		白云石
永3井	5 614.22	1.37	13.92	3.33	8.70	43.33	3.47	24.45		铁白云石
	5 868.00		1.59	3.04	4.78	79.22	5.95	5.04	0.37	含铁方解石
永6井	6 028.60		21.22			52.30	3.63	22.85		铁白云石
	6 084.00			1.36	5.26	91.04		2.34		方解石
永7井	6 095.00			1.27	2.45	92.39	1.76	2.13		方解石
	6 101.55		3.84	4.56	15.13	45.61	7.50	22.51	0.84	铁白云石
永8井	6 088.55		21.43	2.44	1.99	51.05		23.08		铁白云石
	6 096.20			0.95	9.21	85.44		4.02	0.38	方解石

表3 永进地区砂岩碳氧同位素测试分析数据
Table 3 Carbon and oxygen isotope values of sandstones in Yongjin area

井号	岩性	深度/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
永1	灰色细砂岩	5 778.90	-8.09	-19.33
	灰色细砂岩	5 820.80	-5.53	-16.16
	灰色细砂岩	5 827.90	-6.31	-17.94
	灰色细砂岩	5 880.00	-8.21	-19.05
	灰色砂岩	5 870.00	-1.98	-11.62
	灰色砂岩	5 878.00	-2.91	-14.54
永2	灰色细砂岩	5 961.50	-6.36	-15.06
	褐色细砂岩	6 004.30	-9.97	-17.87
	灰色砂岩	5 614.20	-4.63	-12.63
永3	灰色细砂岩	5 614.32	-5.13	-13.60
	灰色砂岩	5 614.90	-7.05	-17.36
	灰色砂岩	5 620.80	-7.10	-18.17
	灰色细砂岩	5 621.10	-7.61	-18.43
	灰色砂岩	5 865.60	-5.87	-21.08
	灰色细砂岩	5 866.35	-19.07	-14.68
	灰色砂岩	5 867.90	-5.92	-21.28
	灰色砂岩	5 869.00	-6.81	-17.31
永6	灰色细砂岩	5 974.40	-5.17	-14.03
	灰色细砂岩	5 977.00	-8.31	-13.96
	褐色细砂岩	6 023.40	-4.93	-14.60
	灰色细砂岩	6 034.90	-6.52	-17.72
	灰色细砂岩	6 044.80	-6.95	-19.03
	灰色细砂岩	6 076.50	-7.08	-16.29
	灰色细砂岩	6 084.60	-7.04	-19.20
	灰色细砂岩	6 093.50	-9.70	-18.35
永7	灰色细砂岩	6 095.00	-7.55	-18.53
	褐色砂岩	6 095.50	-7.37	-16.44
	褐色砂岩	6 096.80	-8.18	-19.95
	褐色砂岩	6 098.60	-7.52	-17.87
	褐色砂岩	6 099.59	-7.60	-17.53
	褐色砂岩	6 101.80	-7.49	-16.15
	褐色砂岩	6 103.60	-7.65	-18.17
	灰色粉砂岩	6 120.00	-4.45	-12.67
永8	灰色砂岩	6 088.50	-11.63	-16.68
	灰色细砂岩	6 088.80	-12.38	-16.88
	灰色砂岩	6 092.00	-10.82	-17.65
	灰色细砂岩	6 093.30	-11.08	-16.04
	灰色砂岩	6 093.50	-10.72	-17.86
	灰色细砂岩	6 094.30	-10.80	-16.78
	灰色砂岩	6 099.40	-4.46	-16.52
	灰色细砂岩	6 099.50	-7.34	-17.40

3 碳酸盐胶结物类型

永进地区砂岩储层中的碳酸盐是胶结物的主要成分,其类型主要包括铁白云石和(铁)方解石,极少量白云石。铸体薄片资料显示方解石一般呈连晶式发育,孔隙式胶结,茜素红与铁氰化钾混合溶液染色表明方解石普遍含铁,在全区都有发育,但含铁量存

在差异(图2a);铁白云石单晶多为菱形,染色后多为天蓝色(图2b),多是交代(铁)方解石形成(图2c);还有一种不染色的白云石(图2d),主要也是交代(铁)方解石形成。

在阴极发光显微镜下,碳酸盐胶结物主要发亮黄色光和桔红光(图2e、2f)。还有一期为不发光的铁白云石(图2f)。能谱分析数据表明,碳酸盐中普遍含铁,高的Fe/Mn值是碳酸盐胶结物阴极发光颜色较暗的决定性因素,也是导致铸体薄片染色后方解石呈现不同深浅红色的原因,也使得阴极发光片中碳酸盐胶结物发不同亮度的光。根据 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 在矿物元素成分中的百分含量和能谱分析,可以将碳酸盐胶结物类型分为方解石、含铁方解石、白云石和铁白云石(表2)。

4 碳酸盐胶结物分布特征

铸体薄片、阴极发光照片等资料表明,碳酸盐胶结物多充填在粒间孔隙中,多呈孔隙式胶结(图2a、2e、2f);在某些薄片可见碳酸盐胶结物交代碎屑颗粒的现象(图2c、2d)。在有碳酸盐胶结物发育的薄片,大多数碎屑颗粒呈点-线接触,没有碳酸盐胶结物发育的部位,碎屑颗粒接触紧密,多为线-凹凸接触,胶结物平面上分布不均衡(图2)。

大量岩矿鉴定结果和油层物性测试分析资料表明,研究区6口井多数样品的碳酸盐胶结物含量小于20%,绝大多数样品小于10%(图3a)。其中铁白云石含量多小于10%,平均含量为4.5%,主要分布在永2井、永6井和永8井中;(铁)方解石含量多小于10%,平均含量为4.1%,主要分布在永1井、永3井和永7井中。

通过永1井、永2井和永6井3口单井中碳酸盐胶结物的纵向分布特征可以看出,(铁)方解石和铁白云石含量随深度的增加不断增加;相对于各井不整合面的位置,(铁)方解石和铁白云石多集中分布在不整合面附近(多数分布在不整合面之下)约100m范围之内(图3b)。

5 形成机制

黄思静(2001)、吴素娟(2005)在鄂尔多斯盆地研究中也发现了同样的现象,即碳酸盐胶结物(主要是铁白云石)集中分布在不整合面附近,研究肯定了

表4 永1井泥岩元素测试分析数据

$w_B/\%$

Table 4 Analytical data of element in mudstones of Yong 1 well

深度/m	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂
5 800.00	14.98	4.04	2.48	3.03	3.40	2.97	0.12	3.00	55.54	0.63
5 826.85	16.47	0.46	1.81	2.80	3.11	1.87	0.03	4.36	63.61	0.51
5 840.00	17.71	1.16	4.77	2.35	4.02	2.77	0.07	3.16	58.13	0.83
5 841.00	18.99	0.79	6.26	2.35	4.39	3.05	0.07	2.83	55.00	0.96
5 846.00	17.47	1.69	5.20	1.86	3.82	2.58	0.08	3.41	56.86	0.78
5 847.00	17.14	1.70	5.13	1.94	3.82	2.53	0.08	3.35	56.87	0.77
5 851.00	16.69	2.28	5.70	1.09	3.62	2.38	0.08	3.33	56.20	0.73
5 858.00	16.93	2.21	5.68	1.09	3.60	2.83	0.12	3.33	55.89	0.73
5 879.74	17.35	0.62	1.33	2.20	3.77	1.80	0.04	3.60	63.31	0.79
5 879.94	15.57	0.49	3.75	1.49	3.46	1.52	0.04	3.47	65.96	0.69
5 901.00	17.37	1.37	6.15	0.97	3.93	2.35	0.09	3.18	57.17	0.78
5 909.00	17.06	0.58	5.34		3.75	1.99	0.05	2.60	60.01	0.83

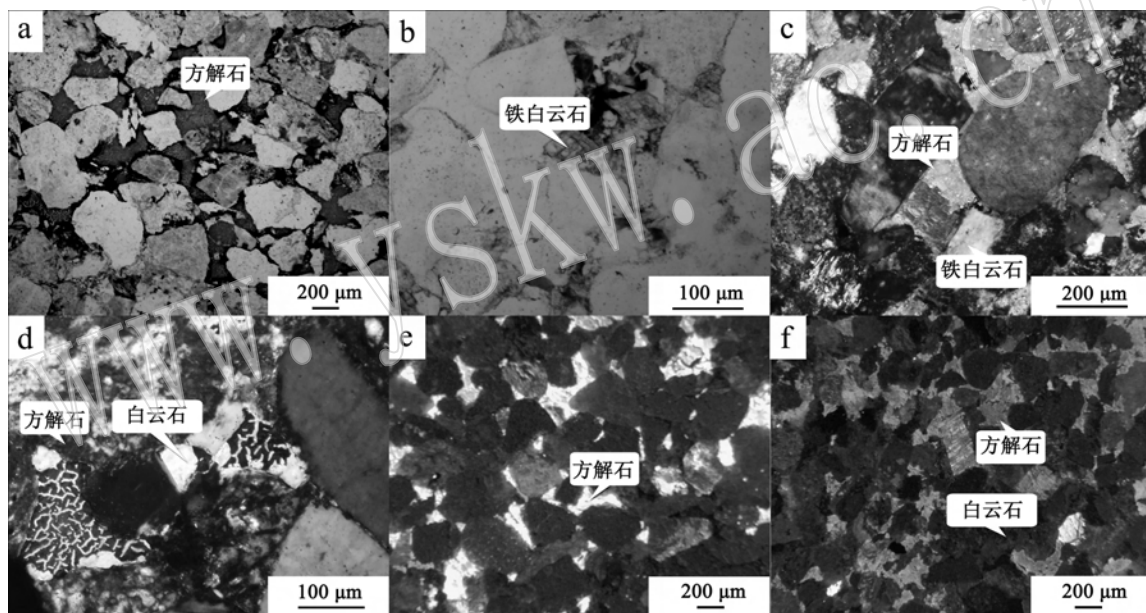


图2 永进地区砂岩储层中碳酸盐胶结物显微特征照片

Fig. 2 Diagnostic micrographs of carbonate cements in sandstone of Yongjin are

a—连晶方解石充填于沥青溶孔中,永6井,6 048.59 m,铸体薄片(染色),(-);b—单晶菱形铁白云石,永6井,6 028.52 m,铸体薄片(染色),(-);c—铁白云石交代方解石,永2井,5 966.02 m,铸体薄片(染色),(+);d—白云石交代(铁)方解石,永2井,5 967.02 m,铸体薄片(染色),(+);e—永7井,6 095 m,阴极发光片;f—永8井,6 099.46 m,阴极发光片

a—secondary pores mainly filled with crystal calcite, with major pores formed by dissolution of asphalt. The microphotograph is a stained red-epoxy-impregnated thin section of the conventional core sample (plainlight, Yong 6 well at 6 048.59 m); b—single crystal rhombus ankerite. The microphotograph is a stained blue-epoxy-impregnated thin section of the conventional core sample (plainlight, Yong 6 well at 6 028.52 m); c—ankerite replacing calcite in a red-epoxy-impregnated thin section of the conventional core sample (crossed polars, Yong 2 well at 5 966.02 m); d—dolomite replacing calcite in a stained red-epoxy-impregnated thin section of the conventional core sample (crossed polars, Yong 2 well at 5 967.02 m); e—calcite cements showing yellow light in cathodoluminescence microphotograph(Yong 7 well at 6 095 m); f—calcite cements showing saffron light and dolomite cements assuming disphotic zone in cathodoluminescence microphotograph(Yong 8 well at 6 099.46 m)

大气淡水作用对含铁碳酸盐岩胶结物形成的意义,认为不整合面的半风化淋滤带顶部发育的泥岩层使得各井不整合面上下的碳酸盐岩胶结物含量普遍较

高,Fe³⁺在半风化淋滤带上部相对富集,含铁的碳酸盐胶结物特别是铁白云石在不整合面附近富集。

但是,永进地区铸体薄片显示,这种含铁成分的

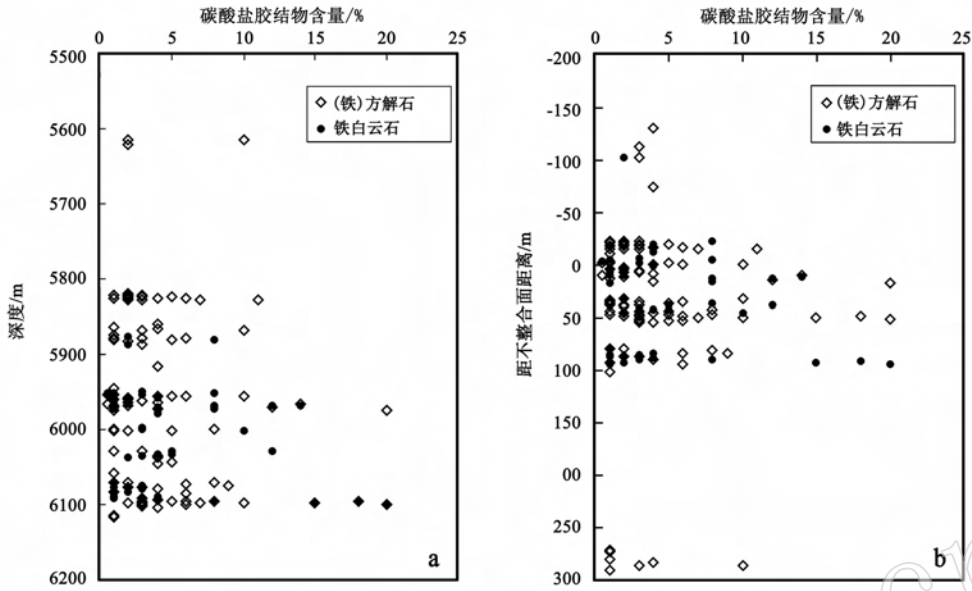


图3 准噶尔盆地腹部永进地区砂岩储层碳酸盐胶结物含量与深度关系图

Fig. 3 Relationship between content of carbonate cements and depth

方解石或铁白云石多充填在粒间溶孔中,说明其形成晚于溶解作用,不同于鄂尔多斯盆地中碳酸盐胶结物主要发育在埋藏压实作用之前。永6井西山窑组6 048.59 m左右可见充填在粒间孔隙的沥青被溶解,后被含铁方解石充填(图2a),铁白云石又有交代含铁方解石的现象(图2c、2d),含铁方解石和铁白云石要晚于沥青形成。而沥青的溶解多是与有机质成熟过程有关,成岩作用研究和成岩序列分析表明含铁方解石和铁白云石的形成应该与有机质成熟有关,属于晚成岩阶段的产物。

为进一步确定碳酸盐胶结物的来源,对研究区6口井的44个砂岩样品进行了碳酸盐胶结物碳、氧同位素分析,所取样品的深度范围为5 770~6 120 m,包括白垩系和侏罗系两个层位。碳、氧同位素资料表明,碳酸盐多具有低负值的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值,总的说来碳酸盐胶结物的碳、氧同位素之间表现为正相关关系(表3、图4),因而碳同位素所反映的物质来源和氧同位素所反映的温度关系之间是有联系的。永3井的1个点和永8井中部分点中碳、氧同位素值存在异常,相关性差,可能是由于铁白云石重结晶后同位素分馏效应造成的。 $\delta^{13}\text{C}$ 值显示碳酸盐碳的来源既有无机成因的也有有机成因的;而 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围较大,说明既有早期成岩时形成的碳酸盐,也有晚期形成的碳酸盐。碳酸盐胶结物 $\delta^{18}\text{O}$ 值集中分布在 $-21.28\text{‰} \sim -11.62\text{‰}$,平均值为 -16.57‰ , $\delta^{13}\text{C}$

值的范围为 $-12.58\text{‰} \sim -4.28$,平均为 -7.03‰ ,表明碳酸盐胶结物的沉淀多与相对更深部位含有机酸的孔隙流体侵入有关。

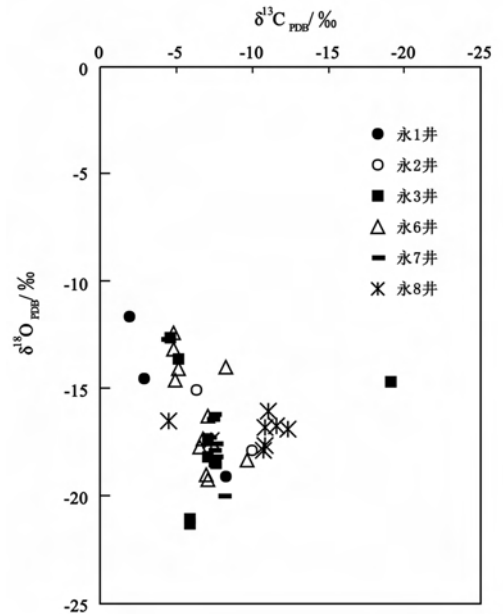


图4 永进地区砂岩储层碳酸盐胶结物碳氧同位素特征

Fig. 4 Stable isotopic data of carbon and oxygen for carbonate cements of Yongjin area sandstones

根据有机质演化过程分析,有机酸对早期碳酸盐胶结物的溶解不仅形成了大量的粒间溶孔,而且也作为晚期含铁碳酸盐胶结物的形成提供了物质基

础。除此之外,研究区砂岩类型主要是长石岩屑砂岩和岩屑砂岩,其中火山岩岩屑含量较高,在有机酸作用下不断溶蚀,为晚期碳酸盐胶结物提供了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等离子;粘土矿物的转化、长石的溶解,都有大量的 Ca^{2+} 生成,也为晚期碳酸盐胶结提供了物质来源。

较大埋深条件下次生孔隙的发育和碳酸盐胶结物的溶蚀,可能是由于热循环对流机制造成的局部溶蚀作用形成的(赵澄林,2000)。在深部热循环对流作用机制下,富含溶解的碳酸盐成分的流体沿储集层的底部向上流动,流体在上倾部位急转向上垂直到储集层顶部,受温度和压力等因素的影响,造成碳酸盐溶解度降低,受不整合面的阻碍就地沉淀,造成不整合面之下晚期发育的含铁碳酸盐胶结物相对富集。

6 碳酸盐胶结物对储层物性的影响

物性测试资料表明,研究区各井不整合面附近砂岩孔隙度值较高(图5),而前面也论述了不整合面附近碳酸盐胶结物相对富集。由于永进地区白垩系和侏罗系之间的不整合所间隔的时间为4~7 Ma(何登发等,2007),那么不整合面附近发育的高孔隙是否因为大气淡水通过不整合面对下伏地层的淋滤而发育?

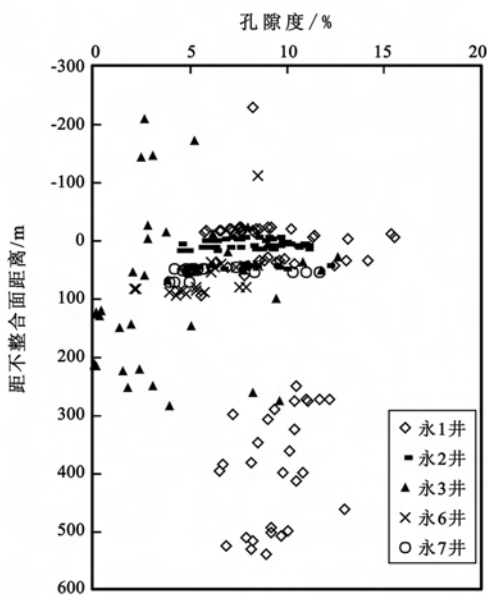


图5 永进地区砂岩储层孔隙度与不整合面位置关系图
Fig. 5 Relationship between reservoir porosity and relative distance from the unconformity of Yongjin area sandstones

本次研究对风化壳(古土壤)的演化程度进行了研究,以期得到风化程度的强弱信息。风化程度一般用成熟度来描述,硅铝率($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)是刻画古土壤成熟度的重要参数(高全洲等,2000;黄成敏等,2001;洪太元等,2006),该比值越小,表明受风化程度越强。由于部分主要元素和微量元素在风化过程中活动性和迁移能力的差异,风化粘土层段相对富含 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 TiO_2 ,而缺少 SiO_2 、 CaO 和 Na_2O (表4、图6)。古土壤层中全氧化铁表观丰度略有增高,主要是碳酸盐被淋滤造成的相对相集,使得铁在价态以及形态上的转化主要为就地完成(刁桂仪等,1999;李徐生等,2007)。

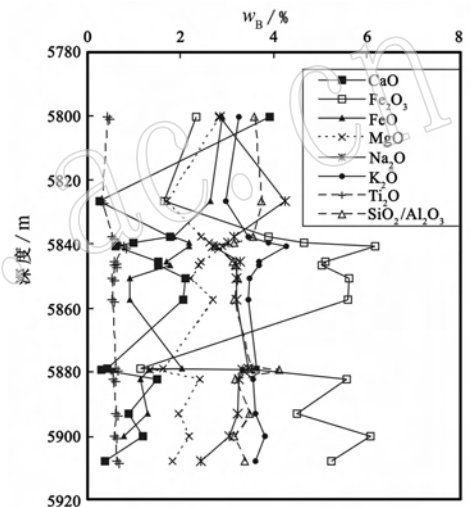


图6 永1井泥岩元素含量与深度关系图

Fig. 6 Relationship between element content of mudstone and depth of Yong 1 well

从永1井微量元素在不整合面附近的变化来看,风化粘土层比较薄,说明大气淡水淋滤作用比较有限;而且受准噶尔盆地古气候的影响,在干旱炎热的气候条件下风化壳的发育过程是以物理风化作用为主,大气淡水淋滤的化学风化作用较弱,使得下部半风化岩石层段成为储集层的可能性降低(李平等,2006)。

斜长石和钾长石与不整合面之间的关系显示(图7),钾长石与不整合面之间关系不明显,这与目前铸体薄片观察到的现象基本一致:钾长石遭受成岩作用的影响较小,颗粒表面新鲜,边缘完整,未见明显蚀变现象;斜长石在不整合面附近比较富集,远离不整合面,其含量略有降低。铸体薄片资料也显示斜长石多发生蚀变作用,生成的高岭石及硅质都就近沉淀充填在溶蚀孔隙之中,表明斜长石的溶蚀现象主要与有机酸作用相关,因为大气淡水淋滤

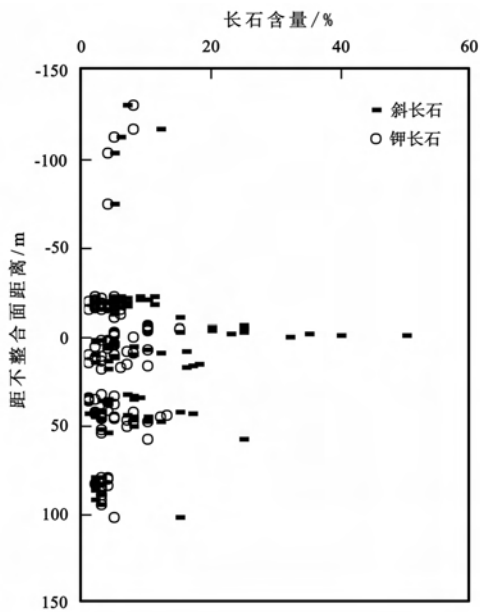


图7 研究区砂岩储层中长石含量与不整合面关系图

Fig. 7 Relationship between content of feldspar and relative distance from the unconformity

作用下长石蚀变形形成的高岭石多由于开放的流体作用而被不断的迁移,不会就近沉淀于孔隙之中。

铸体薄片资料显示,永进地区孔隙类型主要是粒间溶孔(图8a),碎屑颗粒在较大埋深下多呈一线接触,表明颗粒之间曾经发育早期的碳酸盐胶结物。虽然早期碳酸盐胶结物占据了部分孔隙空间,但是岩石所具有的较大粒间孔隙体积使碳酸盐沉淀后仍有孔隙残留,碳酸盐胶结作用所增加的岩石机械强度和抗压实能力会显著改变以后浅埋藏甚至深埋藏过程中的压实曲线,从而使岩石在深埋藏条件下仍具有较高的孔隙度,后期溶解产生的粒间溶孔也相对较多,这样就形成了高孔隙度和高含量碳酸盐在深度上的发育具有重叠的特征(黄思静等,2007)。由于研究区碳酸盐胶结物分布的不均衡性,即使是同一深度的砂岩储层,其物性也表现出较强的非均质性,有碳酸盐胶结物发育的部位,少见孔隙的发育(图8b、8d),碳酸盐胶结物不发育或含量低的部位,孔隙相对发育(图8a、8c)。这可能也说明较大埋深

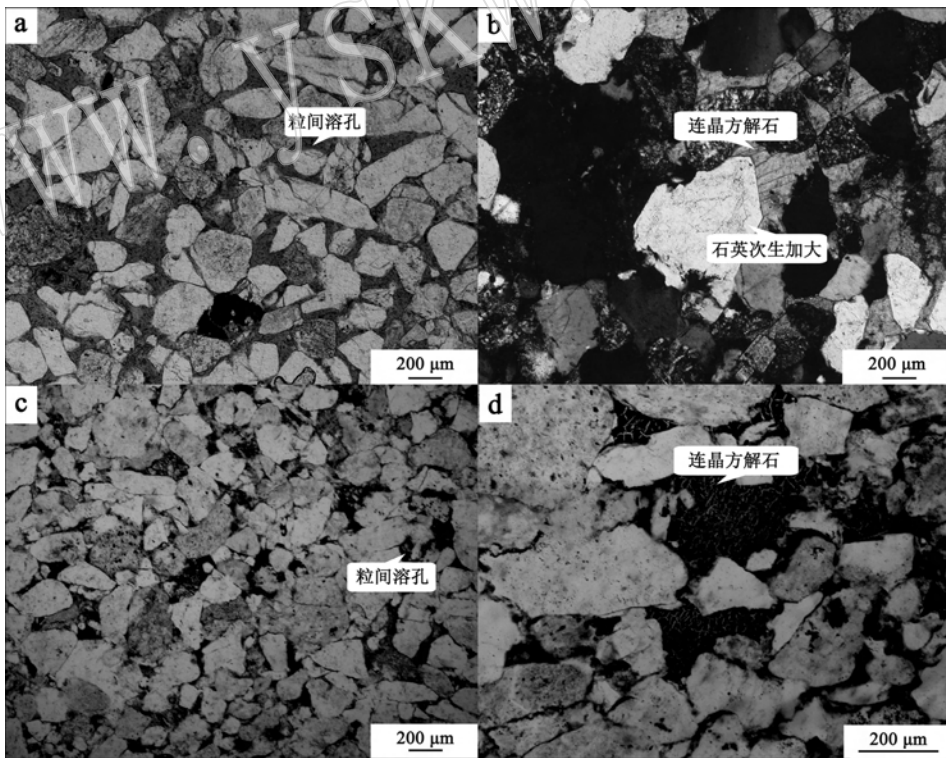


图8 永进地区砂岩储层碳酸盐胶结物与孔隙发育铸体薄片照片

Fig. 8 Diagenetic photos of carbonate cement and pores in sandstone of Yongjin area

a—孔隙全貌,粒间溶孔发育,永1井,5 876 m(-); b—连晶方解石发育,晚于石英次生加大,永1井,5 876 m(+); c—孔隙全貌,粒间溶孔发育,永2井,5 965.12 m(-); d—连晶方解石发育,未见孔隙,永2井,5 965.12 m(-)
a—full view of pores, showing the development of intergranular secondary pores (plainlight, Yong 1 well at 5 876 m); b—crystal calcite and quartz overgrowth, with crystal postdating quartz overgrowth in a stained blue-epoxy-impregnated thin section of the conventional core sample (crossed polars, Yong 1 well at 5 876 m); c—full view of pores, showing the development of intergranular secondary (plainlight, Yong 2 well at 5 965.12 m); d—crystal calcite developed in a stained blue-epoxy-impregnated thin section of the conventional core sample (plainlight, Yong 2 well at 5 965.12 m)

情况下粒间溶蚀孔隙的发育是早期碳酸盐胶结物受有机酸溶解之后物质的重新分配,因此早期碳酸盐胶结物含量相对较多,则一方面利于压实作用的减缓,另一方面有利于后期溶解作用的进行。另外,永进地区白垩系和侏罗系之间存在的角度不整合,使得有机酸浓度在这种类型的不整合面附近异常高(蔡春芳等,1995),由此溶蚀产生的孔隙也相对在不整合面附近比较发育(图5)。而远离不整合面之下的高孔隙的发育,是由于更靠近烃源岩的原因。

但是,由于晚期压实作用和胶结作用的发育,颗粒之间接触紧密,酸性物质对晚期碳酸盐溶解能力有限,晚期碳酸盐胶结物含量和面孔率之间大致呈负相关性(图9),表明了晚期碳酸盐胶结物对储层物性的破坏作用。

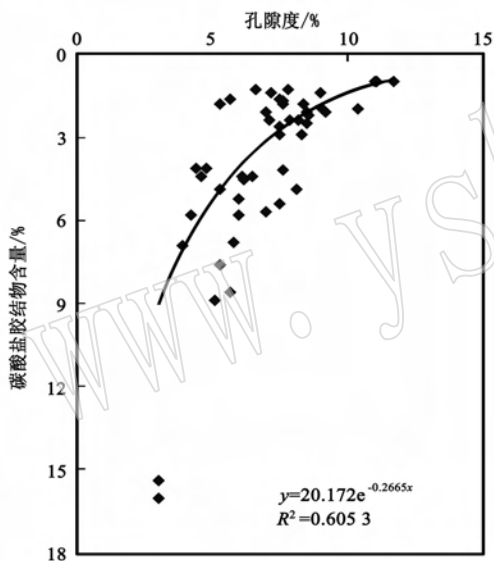


图9 永进地区砂岩储层碳酸盐胶结物含量与面孔率关系图
Fig. 9 Relationship between content of carbonate cements and porosity of Yongjin area sandstones

7 结论

(1) 准噶尔盆地腹部永进地区砂岩储层中,碳酸盐胶结物是最主要的胶结物成分,碳酸盐胶结物主要成分为(铁)方解石和铁白云石,普遍发育早、晚两期碳酸盐胶结且以晚期含铁碳酸盐胶结为主。

(2) 碳酸盐胶结物含量多数样品小于20%,绝大多数样品小于10%。垂向上含量随深度增加而增加,多集中分布在不整合面附近(主要是不整合面之下)约100 m范围之内。

(3) 碳酸盐胶结物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值集中分布在

-21.28‰ ~ -11.62‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为-12.58‰ ~ -4.28‰,碳酸盐胶结物多是充填在粒间溶孔中且部分充填在沥青溶蚀孔隙中,表明碳酸盐胶结物的沉淀多与相对更深部位含有有机酸的孔隙流体侵入有关。

(4) 不整合面附近泥岩中元素测定值和硅铝率反映古土壤受风化程度较弱,大气淡水对其下伏地层破坏作用。物性作用不明显,孔隙和碳酸盐胶结物的形成多与有机酸关系密切,受深部流体热循环机制的影响,有机酸多分布在永进地区白垩系和侏罗系之间的角度不整合附近,使得有机酸溶蚀产生的孔隙也相对在不整合面附近比较发育。

(5) 晚期碳酸盐胶结物含量和面孔率呈互相补偿的关系,表明了晚期碳酸盐胶结物对储层物性的破坏作用。

References

- Bjørlykke K. 1994. Fluid-flow processes and diagenesis in sedimentary basins[J]. Parnell L. Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins[M]. Geological Society Special Publication, 78: 127 ~ 140.
- Cai Chunfang, Mei Bowen, Ma Ting, et al. 1995. Mutual actions among hydrocarbon-water-rock in diagenetic reconstruction system near unconformity in Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 40(24): 2 253 ~ 2 256 (in Chinese).
- Crossey L J, Surdam R C and Lahann R. 1986. Application of organic/inorganic diagenesis to porosity prediction in Gautier. Roles of organic matter in sediment diagenesis[J]. Gautier D L. Special Publication-Society of Economic Paleontologists and Mineralogists[M]. 38: 147 ~ 155.
- Curtis C D. 1978. Possible links between sandstone diagenesis and depth-related geochemical reactions occurring in enclosing mudstones[J]. Journal of the Geological Society of London, 135: 107 ~ 118.
- Diao Guiyi and Wen Qizhong. 1999. The migration series of major elements during loess pedogenesis[J]. Eology-geochemistry, 27(1): 21 ~ 25 (in Chinese).
- Gao Quanzhou, Cui Zhijiu, Liu Gengnian, et al. 2000. The sedimentary geochemistry and mineral characteristics and environmental significance of the laterites on plateau of Tibet[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 39(5): 97 ~ 101 (in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Zhou Lu, Tang Yong, et al. 2007. Characteristics of unconformity between the xishanyao formation and toutunhe formation of middle jurassic in Junggar basin and its significance in petroleum exploration[J]. Journal Palaeogeography, 9(4): 387 ~ 396 (in Chinese with English abstract).
- Hong Taiyuan, Cai Xiyuan, He Zhiliang, et al. 2006. Unconformity features of Cretaceous bottom in the back-land of Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 24(3): 229 ~ 233 (in Chinese).

- Huang Chengmin and Wang Chengshan. 2001. A review on paleosols and uplift of Qinghai-Xizang plateau[J]. Geological Science and Technology Information, 20(4):1~4(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Huang Peipei, Wang Qingdong, *et al.* 2007. The significance of cementation in porosity preservation in deep-buried sandstones[J]. Lithologic Reservoirs, 19(3):7~13(in Chinese).
- Huang Sijing, Wu Wenhui, Liu Jie, *et al.* 2003. Generation of secondary porosity by meteoric water during time of subaerial exposure: an example from Yanchang formation sandstone of triassic of Ordos Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 28(4):419~424(in Chinese with English abstract).
- Jonk R, Hurst A, Durant D, *et al.* 2005. Origin and timing of sand injection, petroleum migration, and diagenesis in Tertiary reservoirs, south Viking Graben North Sea[J]. AAPG Bulletin, 89(3):329~357.
- Li Pingping, Zou Huayao and Hao Fang. 2006. Formation mechanism and effect on petroleum accumulation of the weathering crust, top of Jurassic, in the hinterland of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 24(6):889~896(in Chinese with English abstract).
- Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Shouye, *et al.* 2007. Chemical weathering intensity and element migration features of the xiashu loess profile in Zhenjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 62(11):1174~1184(in Chinese with English abstract).
- Lynch F L. 1996. Mineral/water interaction, fluid flow, and Frio sandstone diagenesis: evidence from the rocks[J]. AAPG Bulletin, 80:486~504.
- Nie Fengjun, Jiang Meizhu, Li Sitian, *et al.* 2005. The responses of sandstone to hot fluid flow and their identified markers—A case study from the western part of the Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science Frontiers, 12(4):581~591(in Chinese with English abstract).
- Surdam R C, Boese S W and Crosse L J. 1984. The chemistry of secondary porosity. Clastic Diagenesis[A]. McDonald D A and Surdam R C [C]. AAPG Memoir, 37:127~149.
- Surdam R C, Crosse L J, Hagen E S, *et al.* 1989. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 73(1):1~23.
- Wang Lichi and Zhang Fushun. 2005. Sediment facies of the second sect of the Sangonghe formation in hinterland of Junggar Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 29(2):13~16.
- Wu Sujuan, Huang Sijing, Sun Zhilei, *et al.* 2005. Dolomite cement and its formation mechanism in the Triassic Yanchang sandstone, Ordos Basin, China[J]. Journal of Chendu University of Technology (Science & Technology Edition), 32(6):569~574(in Chinese with English abstract).
- Xu Shutang, Zhang Hongbo, Zhang Tongzhou, *et al.* 2005. Reservoir diagenesis and its longitudinal zoning characters of Bainyinchagan sag[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 24(4):42~71(in Chinese).
- Zeng Jianhui. 2005. Geofluids flow and hydrocarbon accumulation in sedimentary basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 10(1):37~42(in Chinese).
- Zhang Zhihuan, Chang Xiangchun and Zeng Jianhui. 1998. Research on water rock interaction and its application on petroleum geology[J]. Geological Science and Technology Information, 17(3):69~74(in Chinese).
- Zhang Zhihuan, Hu Wenxuan, Zeng Jianhui, *et al.* 2000. Study of fluid-rock interaction in Eocene Formation in Dongying Depression, Bohai Gulf Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18(4):560~566(in Chinese with English abstract).
- Zhao Chenglin. 2000. Deposition and Reservoir Geology Collected Works [M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).

附中文参考文献

- 蔡春芳,梅博文,马亭,等. 1995. 塔里木盆地不整合面附近成岩改造体系烃-水-岩相互作用[J]. 科学通报, 40(24):2253~2256.
- 刁桂仪,文启忠. 1999. 黄土风化成土过程中主要元素迁移序列[J]. 地质地球化学, 27(1):21~25.
- 高全洲,崔之久,刘耕年,等. 2000. 青藏高原风化壳红土的沉积地球化学和矿物学特征及环境意义[J]. 中山大学学报(自然科学版), 39(5):97~101.
- 何登发,周路,唐勇,等. 2007. 准噶尔盆地中侏罗统西山窑组与头屯河组间不整合面特征及其油气勘探意义[J]. 古地理学报, 9(4):387~396.
- 洪太元,蔡希源,何治亮,等. 2006. 准噶尔盆地腹部白垩系底部不整合特征[J]. 新疆地质, 24(3):229~233.
- 黄成敏,王成善. 2001. 古土壤发育与青藏高原隆升研究综述[J]. 地质科技情报, 20(4):1~4.
- 黄思静,黄培培,王庆东,等. 2007. 胶结作用在深埋藏砂岩孔隙保存中的意义[J]. 岩性油气藏, 19(3):7~13.
- 黄思静,武文慧,刘洁,等. 2003. 大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 28(4):419~424.
- 李平平,邹华耀,郝芳. 2006. 准噶尔盆地腹部侏罗系顶部风化壳的发育机制及其油气成藏效应[J]. 沉积学报, 24(6):889~896.
- 李徐生,韩志勇,杨守业,等. 2007. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J]. 地理学报, 62(11):1174~1184.
- 聂逢君,姜美珠,李思田,等. 2005. 砂岩对热流通作用的响应及识别标记——以珠江口盆地西部为例[J]. 地学前缘, 12(4):581~591.
- 王离迟,张福顺. 2005. 准噶尔盆地腹部三工河组二段沉积微相分析[J]. 大庆石油学院学报, 29(2):13~16.
- 吴素娟,黄思静,孙迅雷,等. 2005. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩中的白云石胶结物及形成机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 32(6):569~574.
- 许书堂,张洪波,张同周,等. 2005. 白音查干凹陷储层成岩作用及其纵向分带特征[J]. 大庆石油地质与开发, 24(4):42~71.
- 曾溅辉. 2005. 沉积盆地中地质流体运动与油气成藏[J]. 海上油气地质, 10(1):37~42.
- 张枝焕,常象春,曾溅辉. 1998. 水-岩相互作用研究及其在石油地质中的应用[J]. 地质科技情报, 17(3):69~74.
- 张枝焕,胡文瑄,曾溅辉,等. 2000. 东营凹陷下第三系流体-岩石相互作用研究[J]. 沉积学报, 18(4):560~566.
- 赵澄林. 2000. 沉积-储层地质文集[M]. 北京:石油工业出版社.