



普光气田深部优质白云岩储层形成机制

马永生* 郭彤楼 赵雪凤 蔡勋育

(中国石化南方勘探开发分公司, 昆明 650200; 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘要 普光大型气田的发现为我国深层海相碳酸盐岩的勘探提供了重要参考. 普光气田发现了目前国内最好的深部白云岩储层, 储层不仅厚度大, 分布范围广, 而且次生孔隙也异常发育. 研究认为, 普光气藏的油气充注时间早、埋藏深、有机质热演化程度高, 烃(油气)-岩(碳酸盐岩储层)-水相互作用的时间长. 该地区次生孔隙的发育受多期次成岩作用的影响, 成因机理复杂. 通过对普光气田长兴组-飞仙关组沉积环境、沉积相带和储层孔隙特征的研究, 认为普光优质白云岩储层的形成是发育在有利沉积相带的基础上, 受表生溶蚀、埋藏溶蚀、超压作用和构造运动等多种因素共同作用的结果, 其中 TSR 对储层的埋藏溶蚀作用和有机质热演化形成的超压作用对长兴组-飞仙关组次生孔隙发育的具有重要的影响.

关键词 深部优质储层 白云岩 溶蚀作用 普光气田 四川盆地

碳酸盐岩储层在油气勘探领域中具有十分重要的地位, 世界上超过 60% 的油气产量都是来自碳酸盐岩储层, 其中多半是白云岩储层; 且随着深度的增加白云岩储层所占比重呈逐渐增大的趋势^[1~3]. 我国海相地层分布十分广泛, 面积逾 300 多万平方公里. 我国海相油气资源量丰富, 海相碳酸盐岩具有良好的勘探潜势. 目前四川盆地川东北地区 and 塔里木盆地塔中和塔北地区海相碳酸盐岩勘探已取得了重大突破, 为我国海相油气勘探增加了信心.

由于我国海相地层主要分布在古生界(中生界也有一些分布), 目前埋藏比较深(大部分在 4000 m 以上), 同时这些地层在沉积后或成藏后又经历了多期次构造运动的改造, 储层成岩和油气成藏都非常复杂, 勘探难度较大. 对于碳酸盐岩优质储层的形成, 多数学者研究认为: 白云岩化^[3~9]、表生溶蚀^[10,11]、有机酸溶蚀^[12]、热液溶蚀^[13]和裂缝作用^[12]等是深部碳酸盐岩孔隙发育的主要控制因素. 近年来一些新的观点如 TSR 作用^[14]、烃-水-岩相互作用^[15~17]、原油裂解超压

效应^[18,19]、构造抬升效应等逐渐受到关注. 如何解释普光气田长兴组-飞仙关组这个目前国内最好的深部碳酸盐岩储层孔隙发育的机理, 是海相地质研究者研究的热点.

1 普光气田石油地质特征

1.1 地质概况

普光气田位于川东北断褶带双石庙-普光 NE 向背斜构造带北段的鼻状构造带上(图 1(b)), 气藏类型属于构造-岩性复合圈闭, 储层主要位于上二叠统长兴组(生物礁储层)和下三叠统飞仙关组(鲕粒滩储层)(图 1(c)), 其中长兴组上部礁盖白云岩最为发育, 下部的礁核相白云岩则不发育; 飞仙关组主要发育台地边缘浅滩相储层^[20,21]. 飞仙关组上部飞四段的膏岩、致密含泥灰岩及其二者的互层组成了飞一至飞三气藏的直接盖层, 三叠系嘉陵江组和雷口坡组的巨厚膏岩层组成了该气藏直接盖层和区域盖层. 该区发育多套烃源岩, 主要有下寒武统灰黑色泥页岩、下

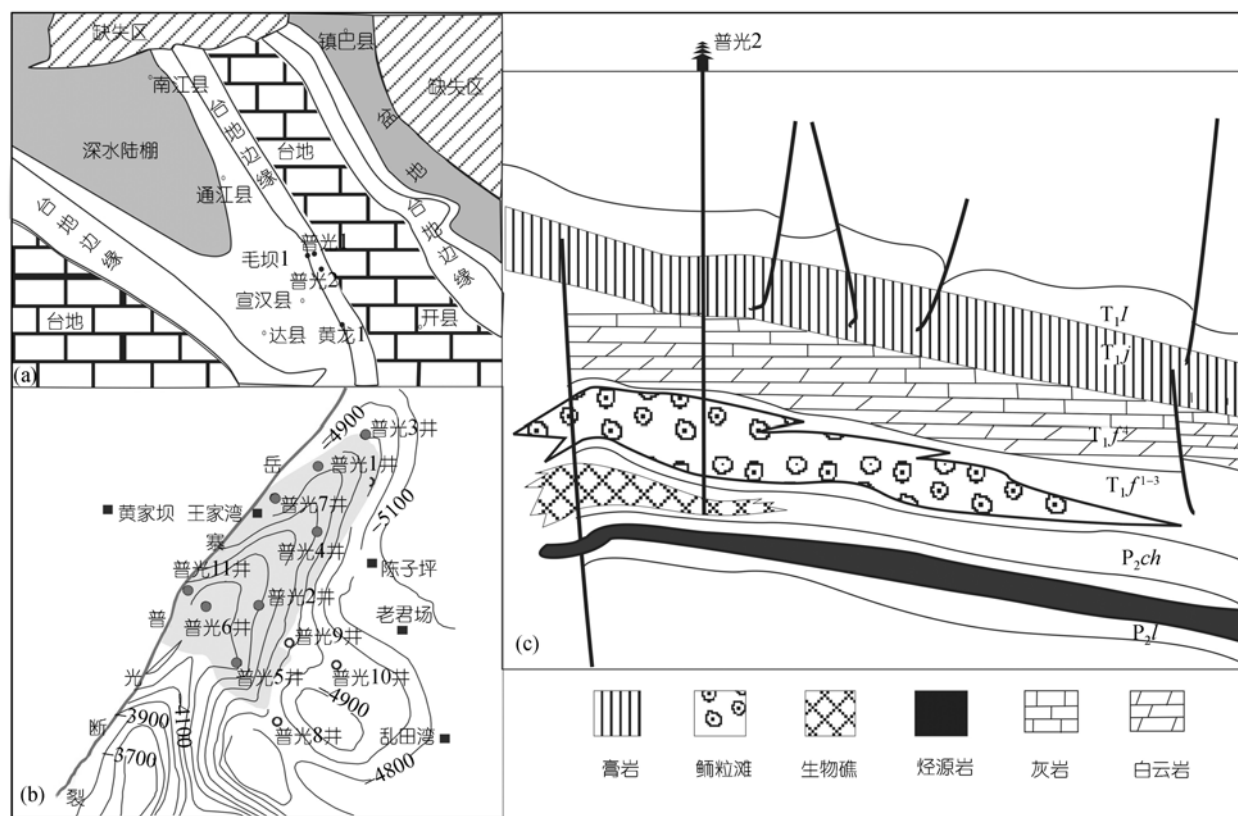


图 1 四川盆地普光地区长兴组初期沉积相图(a)、普光气田构造位置(b)、普光气藏剖面图(c)

志留统龙马溪组黑色页岩、泥岩和上二叠统龙潭组的煤系、暗色泥岩。其中龙马溪组烃源岩和龙潭组烃源岩是普光气田的主力气源^[22]。

1.2 古沉积环境

川东北地区长兴组-飞仙关组时期海平面整体上经历了先上升后下降的过程^[23,24](图 2), 普光地区根据沉积环境的不同大致可分为 3 个区域: 深水陆棚区域、碳酸盐台地地区和碳酸盐斜坡区域。普光气田的优质储层主要发育在碳酸盐台地和深水陆棚之间的碳酸盐台地边缘带区域(图 1(a))。台地边缘带区域在长兴组初期主要为开阔台地相沉积, 沉积物以泥晶灰岩和含砾生屑灰岩为主, 原生孔隙相对不发育; 长兴组中期海平面呈不断上升趋势, 沉积相逐渐演化为台地边缘生物礁相, 沉积物以生物礁骨架为主, 原生骨架孔发育; 长兴组中后期海平面上升过程中有小幅升降变化, 生物礁反复暴露在海平面以上, 发育多旋回生物礁-滩相沉积组合, 沉积物以生屑、生物礁骨架、鲕粒、团块为主, 原生骨架孔、粒间孔发

育; 长兴组沉积末期—飞仙关组沉积初期为大规模的海侵期, 沉积物以泥晶灰岩为主, 原生孔隙不发育; 飞一段中期至飞二段海平面开始呈下降趋势, 沉积相为台地边缘浅滩相, 沉积了较厚的鲕粒、颗粒灰岩, 粒间孔广泛发育, 其中海平面的旋回变化, 也沉积了多层薄层膏岩; 飞二段末期至飞三段沉积相演化为局限台地相, 沉积物主要为灰质白云岩、粉晶白云岩、泥晶白云岩和膏岩, 原生孔隙不发育; 飞四段主要为蒸发坪沉积环境, 蒸发岩最为发育, 比较致密, 是飞仙关组的盖层之一(图 2)。

普光地区的碳酸盐台地, 长兴期主要为开阔台地沉积环境, 沉积物主要为生屑灰岩、砂屑灰岩, 顶部为泥晶灰岩, 原生孔隙不发育; 飞仙关期由局限台地向蒸发台地演化, 沉积物主要为泥-粉晶白云岩、灰岩和膏岩, 孔隙度和渗透率比较低, 储层不发育。普光地区的深水陆棚区域, 长兴期主要为深水盆地沉积, 沉积物主要为硅质岩和页岩, 飞仙关期逐渐变浅, 沉积物以灰岩和泥灰岩为主, 沉积物比较致密, 也没有良好的储层发育。

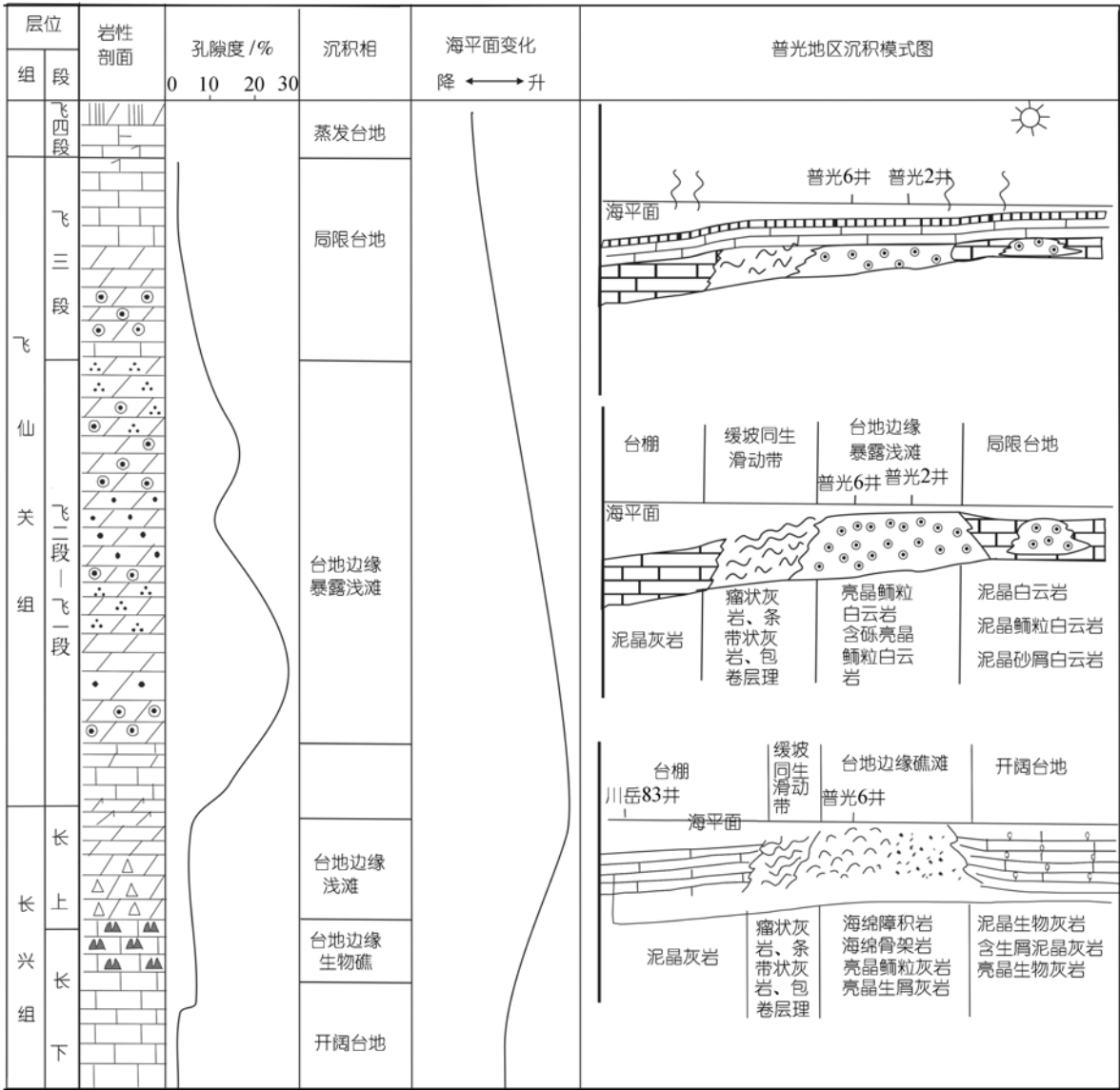


图2 普光地区长兴组-飞仙关组沉积演化及沉积模式图

1.3 天然气特征

普光气田的天然气为典型的干气^[24]，甲烷含量在72%~80%，乙烷含量基本上在0.05%以下，乙烷以上的重烃几乎检测不到，二氧化碳的含量大致在3%~10.5%，硫化氢的含量在12.7%~17.2%的范围内(表1)，属于高含硫化氢天然气，也是国内目前发现的硫化氢含量最高的天然气之一^[25]。

2 长兴组-飞仙关组储层特征

飞仙关组储层主要分布在飞一至飞三段，岩性主要为鲕粒灰岩、鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩、溶孔白云岩等，其中鲕粒白云岩和残余鲕粒白云岩为

两种重要类型。鲕粒白云岩以中细晶为主，多为低能鲕，选择性溶蚀比较强烈，溶蚀孔隙较发育，储层以高孔高渗为主；残余鲕粒白云岩由于重结晶现象比较普遍，除了溶蚀孔隙发育外，还发育大量的晶间孔隙，以高孔高渗储层为主；糖粒状残余鲕粒中粗晶白云岩，晶间孔和晶间溶蚀孔极为发育，储集性能极好；含砾屑鲕粒白云岩以细-粗晶为主，主要发育鲕模孔和粒内溶孔，孔隙度较好，但渗透率较低；含砂屑泥晶白云岩以粉细晶为主，孔渗性都较差；结晶白云岩以粉-中晶为主，储层主要为低孔高渗储层。

长兴组储层主要为一套礁滩-白云岩组合储层，主要岩性为结晶白云岩、生屑白云岩、砂屑白云岩、

表 1 普光气田天然气组分特征

井号	层位	井段/m	天然气组分/%							
			CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	H ₂ S	CO ₂	N ₂	H ₂	He
普光 1	T ₁ f	5610	77.5	0.02	0	12.7	9.1	0.62	0.04	0.01
	T ₁ f	5062	75.6	0.11	0	15.8	7.96	0.44	0.03	0.01
	T ₁ f	5027	80	0.06	0	14.7	2.55	0.46	2.19	0.01
普光 2	T ₁ f	4958	74.3	0.22	0	17.2	7.9	0.42	0.01	0.01
	T ₁ f	4801	76.1	0.02	0	15.5	7.71	0.44	0.01	0.01
	P ₂ ch	5315	74.2	0.02	0.001	16.0	9.46			
	P ₂ ch	5259	75	0.33	0.001	15.4	8.73	0.47	0.02	0.01
普光 4	T ₁ f	5770	73.8	0.03	0	17.1	8.47	0.59	0	0.02
普光 6	T ₁ f	5044	74.7	0.03	0	14.1	10.5	0.65	0.06	0.01
	P ₂ ch	5240	75.9	0.05	0	14.7	8.74	0.49	0.06	0.01

砾屑白云岩、海绵礁白云岩、海绵礁灰岩。其中结晶白云岩、砾屑白云岩和海绵礁白云岩为重要的岩石类型。结晶白云岩以粉-中晶白云岩为主，因新生变形作用强烈，溶孔和晶间孔发育，多为中孔高渗储层；砂屑白云岩多以细-粉晶为主，储层主要为中低孔中高渗储层；生屑白云岩含极少量泥质成分，生物颗粒含量较高，新生变形不均匀，储层以中低孔高渗为主；砾屑白云岩成分复杂，多以残余鲕粒粉细晶白云岩、粉细晶白云岩、以及残余生屑白云岩为主，溶孔较发育，储层以中高孔高渗为主；海绵礁白云岩多为细晶结构，孔隙类型多见生物格架孔和溶孔，溶孔孔壁多见沥青残余物质。储层以中高孔高渗为主；海绵礁灰

岩溶孔不发育，储层以低孔低渗为主(图 3)。

飞仙关-长兴组储层的孔隙类型可分为两大类型：一种是与溶蚀有关的孔隙，主要包括溶孔、溶洞、溶缝等；另一种是与溶蚀无关的孔隙，主要包括晶间孔和原生粒间孔。飞仙关组储层以溶蚀孔(洞、缝)具有绝对优势，所占比例>80%，次为晶间孔，所占比例在1%~15%之间；原生粒间孔基本消失或多数经后期溶蚀改造后不易识别。长兴组的白云岩储层主要发育晶间孔、晶间溶缝、超大溶孔等；石灰岩除少数具溶蚀孔、洞、铸模孔之外，基本上以泥晶微孔为主。生物礁的骨架孔，一般都被亮晶方解石填充，未白云石化者多是泥晶胶结。

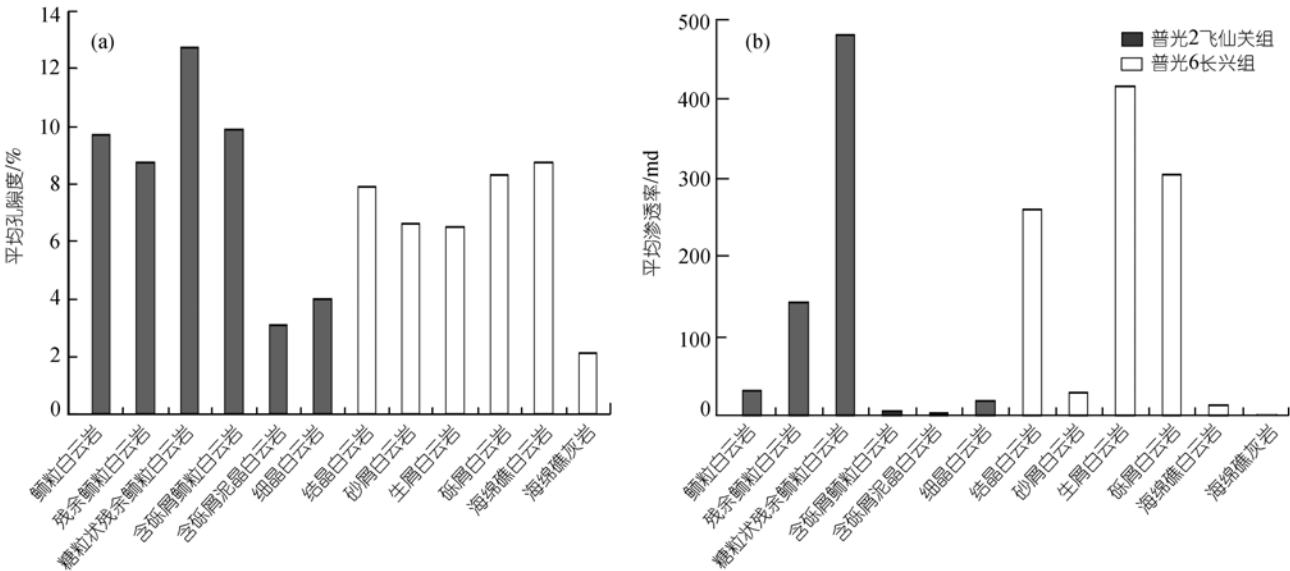


图 3 飞仙关-长兴组不同岩性的孔隙度和渗透率

(a) 飞仙关-长兴组不同岩性的孔隙度对比图; (b) 飞仙关-长兴组不同岩性的渗透率对比图

裂缝系统作为有效孔隙和流体的运移通道对普光优质储层的发育起着重要的作用。飞仙关组的裂缝主要包括压性微裂隙和张性微裂隙，两期压性微裂隙分别被少量碳质沥青和白云石晶体充填，三期张性裂隙前两期被方解石充填，晚期末被充填。对长兴组-飞仙关组储层来说，虽然裂缝广泛发育，但其主要的储集空间还是溶蚀孔隙。

长兴组中的裂缝主要包括压溶缝合线和构造裂缝两种类型。统计表明长兴组共发育两期缝合线和三期构造裂缝，早期缝合线多被泥质或其它不溶残余物充填，对储层物性没有贡献；晚期缝合线多被沥青填充或半填充。早期的构造裂缝发生在浅埋阶段，仅局部地区发育，多被白云石脉填充；中期裂缝多被沥青充填；晚期裂缝无充填。

3 长兴组-飞仙关组储层发育的控制因素

3.1 有利的沉积相带

有利的沉积相带是优质储层发育的基础，因为沉积相带不仅控制着沉积物的结构、组分和原生孔隙的发育程度，而且还影响着沉积后的成岩作用(孔隙水中的一些离子和与孔隙水作用的矿物来源于古沉积物质)。虽然原生孔隙在后期的压实和压溶过程中会大量损失，但残余的原生孔隙是溶蚀流体主要的运移通道，也是一些溶蚀孔隙的前身，还对次生孔隙的发育具有重要的作用。普光地区不同的沉积环境下，储层的发育也各不相同(表 2)，优质储层主要发育在浅海高能沉积环境下的原生孔隙发育的地区。普光气田长兴组-飞仙关组储层主要为浅海高能生物礁和鲕粒滩相沉积^[26,27]，原生骨架孔和粒间孔广泛发育，为次生溶蚀孔隙的发育打下了良好的基础。邻区的深水陆棚和碳酸盐台地沉积物多为比较致密的泥-粉晶白云岩或灰岩，原生孔隙不发育，一般不能

发育成优质储层。

3.2 同生期岩溶作用

同生期岩溶作用对碳酸盐岩储层的形成具有重要的贡献^[28]。普光地区长兴组-飞仙关组沉积阶段，海平面多期次旋回下降，使长兴组生物礁和飞仙关组的鲕粒滩沉积不断暴露在大水水渗滤带，发生表生溶蚀。最易溶蚀的是一些不稳定矿物：文石、高镁方解石，其次是石膏和方解石(此阶段石膏的溶解度大于方解石)。形成的孔隙主要是铸模孔，包括鲕模孔和生物模孔，该阶段形成的鲕模孔多具有示底构造(图 4(a))。

3.3 早期白云岩化作用

白云岩具有有利于孔隙发育和保存的性质。由于白云石的比重比较大，白云岩化的过程可能有利于粒内孔和晶间孔的发育，而且相对于方解石来说，白云石的机械性能比较好，在压溶阶段方解石倾向于被压溶，白云石则倾向于被压裂，这种性质有利于白云岩中粒间孔的保存和裂缝的发育；而且白云岩裂缝易保持开启状态。国内外的研究和勘探实践也证实随着埋藏深度的增加，白云岩中原生孔隙减少的速度比灰岩慢^[29,30]。

长兴晚期和飞一至飞二段的淡水淋滤过程一方面产生了表生溶蚀孔隙，同时也形成了混合水环境，发生了早期混合水白云化作用。长兴组中期为海平面的持续上升期，有利于生物礁的持续生长，但不适于发生白云岩化，主要发育礁灰岩；长兴组后期海平面多期旋回变化，形成的礁滩混合储层不断暴露在大水环境中，形成混合水环境，发生了白云化作用，储层岩性主要为白云岩。长兴组中期和后期岩性的差别是长兴组后期发生混合水白云岩化成因的良好证据。飞一至飞二段的鲕粒滩白云岩储层也具有混

表 2 沉积环境和原生孔隙发育情况

层位	沉积亚相	沉积物	岩性	原生孔隙发育程度	储层发育程度
长兴组	滩间	泥晶灰岩、生屑灰岩	灰岩	不发育	不发育
	生物礁	粘结岩、障积岩	灰岩	发育	不发育
	生物礁-滩	生屑、鲕粒灰岩、蒸发岩	白云岩	发育	发育
	深水盆地	硅质岩、页岩		不发育	不发育
	开阔台地	生屑、砂屑灰岩、泥晶灰岩	灰岩	不发育	不发育
飞仙关组	浅滩	鲕粒灰岩、颗粒灰岩	白云岩	发育	发育
	局限台地		白云岩	不发育	不发育
		灰岩、泥灰岩	灰岩	不发育	不发育
	泻湖	泥-粉晶云岩、膏岩	白云岩	不发育	不发育

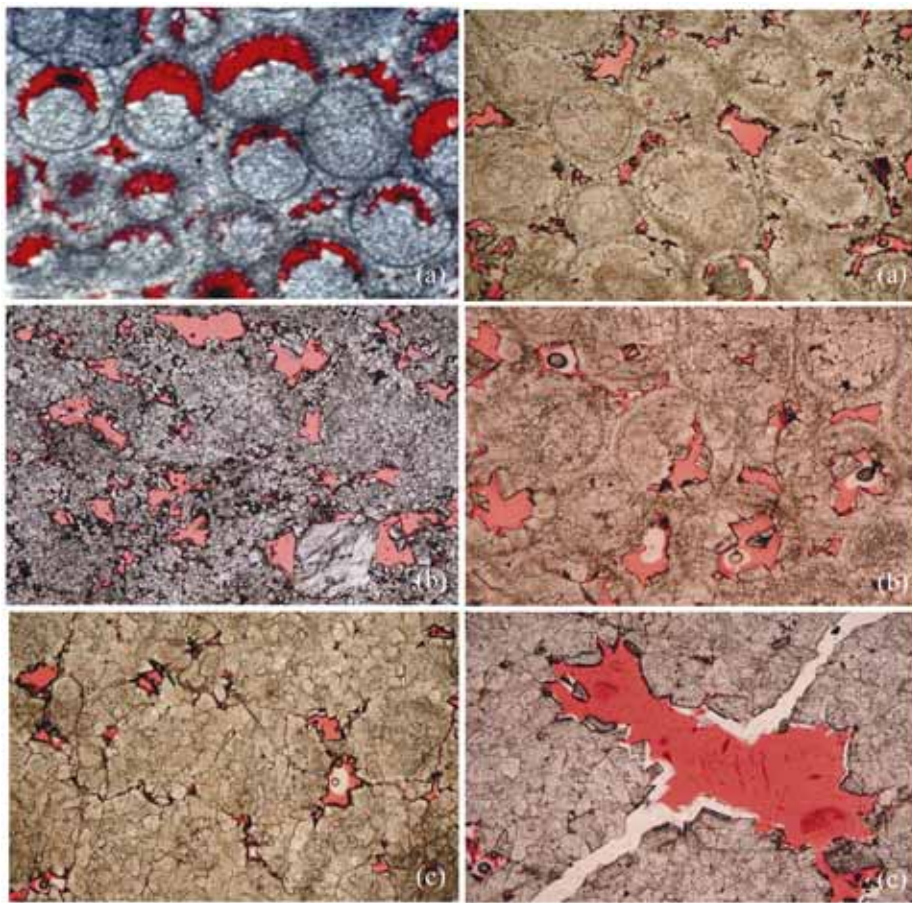


图 4 普光气田储层微观特征

(a) 残余鲕粒白云岩, 显著的示顶底构造, 表生溶蚀作用的产物, 普光 2 井, 飞仙关组; (b) 溶孔细晶鲕粒白云岩, 晶间和粒间溶孔, 粒内溶孔非常发育, 孔内普遍充填有沥青, 普光 2 井, 井深 4965.72 m; (c) 溶孔微-粉晶白云岩, 以发育超大溶孔, 溶孔普遍充填有沥青, 个别溶孔内充填有自形白云石晶体, 普光 2 井, 井深 4775.78m; (d) 川东北飞仙关组细-中晶白云岩, 受 H_2S 溶蚀强烈, 大的溶蚀孔洞, 后有自生白云石半填充, 5145.5m; (e) 碎裂化溶孔细晶白云岩, 具残余鲕粒结构, 溶孔主要沿裂缝发育, 普光 2 井, 井深 5033.71 m; (f) 碎裂化溶孔细晶白云岩中的超大溶孔, 普光 2 井, 井深 5026.50 m

含水成因。早期形成的白云岩, 有序度相对较低, 但也具有了一定的白云岩的性质, 对原生孔隙还是起到了一定的保存作用。而且早期的白云岩化为后期埋藏白云岩化打下了基础^[31,32], 在深埋的过程中又不断进行了调整和重结晶, 形成今天有序度较高结晶程度较好的白云岩。

3.4 早期快速埋藏和烃类充注

研究表明持续浅埋 - 快速深埋过程有利于储层的发育^[33]。普光气田长兴组-飞仙关组早期埋藏不仅是快速埋藏, 而且快速埋藏末期和烃类充注具有良好匹配关系这更有利于原生孔隙的保存。

川东北地区受早印支运动的影响, 早三叠世开始大幅度沉降(图 5), 飞仙关组和嘉陵江组沉积了近 2000 m 厚的沉积物。到晚三叠世长兴组-飞仙关组快

速埋藏到 3000 m 左右, 此时志留系烃源岩开始进入生烃门限, 有机酸和一些烃类物质开始逐渐侵入储层, 改变了孔隙水的性质使其呈弱酸性, 抑制了碳酸盐岩的胶结作用, 更好的保持了原生孔隙。

3.5 有机酸的溶蚀作用

有机酸是造成碳酸盐岩储层深埋溶蚀的主要应力之一, 普光地区在晚三叠世时志留系烃源岩开始进入生油门限^[22], 有机酸和烃类进入储层, 对保存下来的原生孔隙进行扩容或增加新的溶蚀孔隙。因为有机酸的酸性有限, 增加的溶蚀孔隙也有限, 该期形成的溶蚀孔隙多被沥青填充或半填充(见图 4(b), (c))。随着埋深继续增加温度升高, 有机酸开始发生脱羧反应, 产生 CO_2 , 腐蚀性逐渐减弱, 地层水的化学性质逐渐过渡为受 CO_2 等酸性气体的控制。

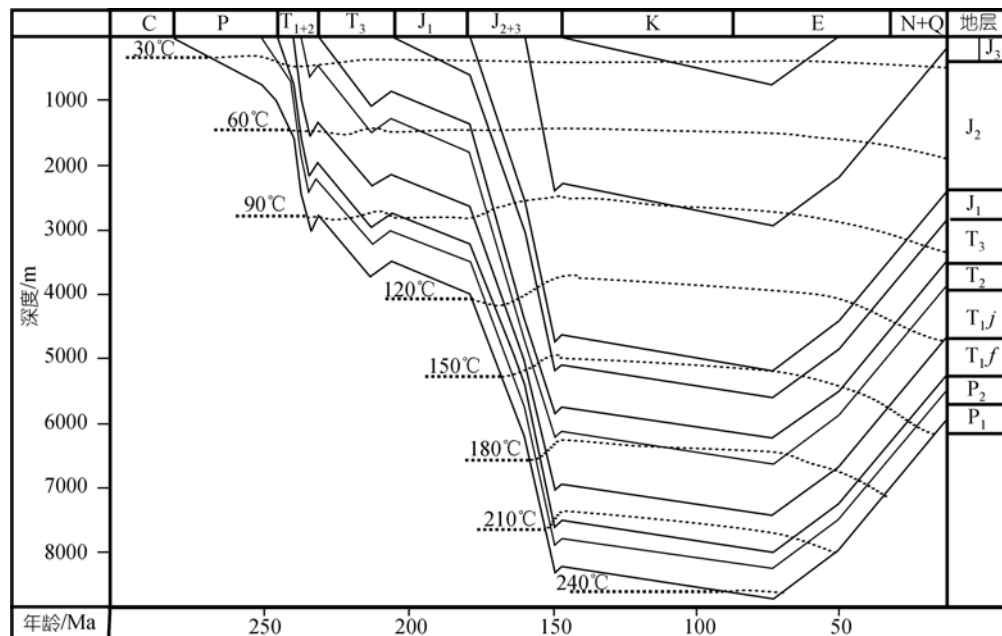


图5 普光2埋藏历史曲线

3.6 TSR 造成的溶蚀作用

普光气田天然气具有 H_2S 含量高($>14\%$)的特点, 研究证明该区的 H_2S 主要是硫酸盐热化学还原反应 (TSR)造成的^[34]. TSR 是指高温条件下(一般大于 120°C), 烃类和硫酸盐反应, 硫酸根离子被还原, 烃类被氧化, 生成 H_2S 和 CO_2 , 并常见金属硫化物(黄铁矿、闪锌矿等)伴生. 普光长兴组-飞仙关组多层薄的膏岩夹层提供了充足的硫酸根来源, 古油藏的早期充注提供了充分的烃类物质, 再加上从侏罗系开始储层温度就一直在 120°C 以上, 为 TSR 提供了充足的反应时间, 这些条件表明普光气田具备发生 TSR 反应的条件. TSR 反应可能从两方面来改善储层的性质: 一方面是白云岩化, 另一方面是溶蚀作用.

TSR 反应大量消耗孔隙水中的 SO_4^{2-} 离子, SO_4^{2-} 离子的减少会降低白云石的溶解度. 已有研究表明浅埋环境下, 硫化细菌引起的硫酸盐还原作用(BSR)会引发白云石的沉淀^[35], 也有研究表明硫酸盐热化学还原反应会引发鞍状白云石的产生^[36,37]. 普光气田优质的白云岩储层, 除了早期混合水白云岩化成因外, 也发生了后期的埋藏白云岩化, 扫描电镜下, 可见晶形良好的白云石和鞍状白云石, 是典型后期埋藏白云岩化的产物, TSR 则可能是其埋藏白云岩化的动力因素之一.

TSR 反应对储层的溶蚀作用主要是通过 H_2S 来改变储层孔隙水的性质. 目前关于 H_2S 溶蚀机理存在有多种解释, 最广为接受观点认为 H_2S 和孔隙水中的碱金属阳离子反应, 生成金属硫化物并游离出 H^+ , 金属硫化物的溶解度特别低, S^{2-} 遇到金属阳离子就能快速沉淀, 如果有充足的 H_2S 和阳离子, 游离出的大量 H^+ 和其他酸根离子结合, 便可生成大量的具有腐蚀性的酸, 对碳酸盐岩储层造成强烈的溶蚀^[38,39]; 若阳离子不充分, H_2S 也会溶于水生成的氢硫酸, 对碳酸盐岩具有强烈的腐蚀作用^[40~44], 而且模拟试验也证实了硫化氢对碳酸盐岩储层具有十分强烈的溶蚀作用^[45].

普光长兴组-飞仙关组孔壁和裂缝处可见分散的黄铁矿, 说明该区发生了 H_2S 和金属阳离子的反应, 而且黄铁矿的硫同位素分析也证实该硫来自于 TSR 反应形成的硫化氢^[34]. 川东北地区高含 H_2S 气藏对比研究发现其白云岩储层孔隙的发育程度与气藏中 H_2S 的浓度成正比, 即硫化氢含量越高, 储层的次生孔隙越发育, 有效储层的厚度和优质储层的厚度也越大^[14,46], 这说明了 H_2S 对储层起到了强烈的溶蚀作用, 这也是普光地区飞仙关组-长兴组优质白云岩储层形成的最重要机制. 该阶段形成的次生孔隙溶蚀面比较干净(见图 4(d)), 溶蚀孔洞较高大.

3.7 超压作用

原油裂解成气会产生强烈的增压效应. 理论计算表明, 理想封闭系统内, 1% 体积的原油裂解产生的气体可使储层压力达到静岩压力^[18]. 模拟实验表明, 在标准温度、压力条件下, 单位体积的标准原油可裂解产生 534.3 体积的气体^[17]. 超压对次生孔隙的发育和保存具有积极的作用: () 超压可以增大酸性气体(CO_2 和 H_2S 等)在地层水中的溶解度, 增强地层水的腐蚀性; () 超压在一定阶段可以产生微裂缝, 使储层孔隙间的连通性大大提高, 改善储层性质; () 超压可以支撑次生孔隙, 使其在埋深的过程中不被压实, 起到良好的孔隙保持作用.

普光气藏 TSR 广泛发生, 致使气藏的压力演化

不同于一般气藏. TSR 对储层压力的影响表现在两个方面, 首先在 TSR 反应过程中, 硫酸根离子和重烃先发生反应, 这使 TSR 作为烃类热裂解的催化剂, 不仅加速了烃类裂解成气而且还可以使烃类裂解比较充分, 理论上会造成比一般热裂解更大的超压. TSR 产生的 H_2S 造成的溶蚀会增大气体的存储空间, 随着烃类裂解压力不断增大, H_2S 和 CO_2 在孔隙水中的溶解度也在不断增大, 更增强了溶蚀效应, 增大存储空间, 对压力增长起到负效应. 川东北气藏的对比研究表明高含 H_2S 气藏都不属于高压气藏, 而且储层的压力系数和 H_2S 浓度成反比^[46], 这说明了 TSR 最终对超压起到的负效应也非常显著, 因此普光气田经历过超压到卸压的过程.

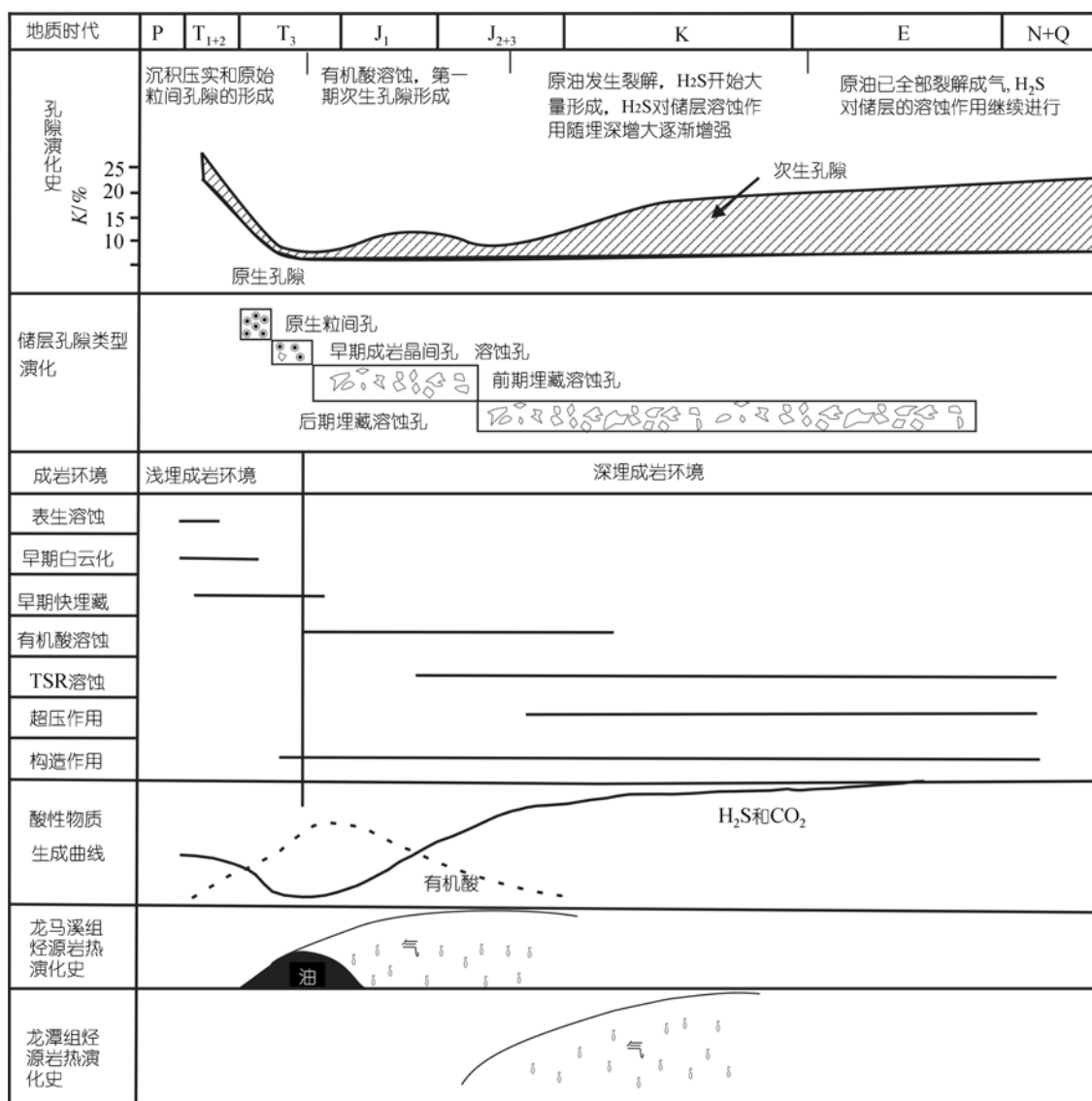


图 6 普光气田飞仙关组储层发育主要控制因素和孔隙演化图

3.8 构造运动的影响

对普光气田长兴组-飞仙关组储层来说, 构造运动对次生孔隙的影响主要表现在构造裂缝作用和构造抬升作用两个方面. 构造微裂缝是埋藏溶蚀流体和烃类运移的重要通道, 一些次生溶蚀孔隙多沿裂缝发育(图 4(e)), 烃类充注前形成的裂缝多见沥青充填现象, 烃类充注后形成的裂缝多见方解石脉充填现象(图 4(f)). 长兴组-飞仙关组发生了五期断裂活动, 两期为张性破裂, 三期为压性破裂, 形成了张性裂缝和压性微裂缝. 这些微孔隙的发育很好的改善了储层的连通性, 增大了储层有效的储集空间.

构造抬升作用主要发生在晚白垩世以后, TSR 反应已经广泛发生, 储层埋深从 7000 多米上升到 5000 m 左右. 构造抬升使储层温度降低, 增大了 H_2S 和 CO_2 在孔隙水中的溶解度, 增强了孔隙水的溶蚀能力, 增加了次生孔隙的发育.

由此来看, 普光气田优质储层的发育是在有利沉积相带的基础上, 经多因素相互影响, 共同控制的结果(图 6).

4 结论

普光气田长兴组的生物礁滩沉积相、飞仙关组鲕粒滩沉积相和同生期多期大气淡水的淋滤, 不仅使长兴组-飞仙关组沉积原生孔隙大量发育, 同时还发生了同生期混合水白云岩化, 为后期次生孔隙和白云岩化的发生打下了坚实的基础. 早期的白云岩化和快速深埋更使一部分原生孔隙得以有效保存, 对普光优质储层的发育做出了贡献.

有机酸溶蚀和 TSR 溶蚀是普光优质储层次生孔隙大量发育的关键控制因素, 普光气藏烃类充注时间早和储层相互作用时间长, 烃类充注后储层又经历了大幅度深埋, 有机质热演化程度高, TSR 不仅对有机质热演化起到了催化作用, 更加强了烃类的热演化和成岩作用的相互影响, 对储层造成了强烈的溶蚀.

参 考 文 献

- 戴金星, 秦胜飞, 陶士振, 等. 中国天然气工业发展趋势和天然气地质学理论重要进展. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 127—142
- 金之钧. 中国海相碳酸盐岩系油气勘探特殊性问题. 地学前缘, 2005, 12(3): 15—22
- Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics. AAPG Bull, 1995, 79 (2): 186—204
- 马永生, 郭旭升, 郭彤楼, 等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示. 地质论评, 2005, 51(4): 477—480
- 张水昌, 朱光有, 梁英波. 四川盆地普光大型气田 H_2S 及优质储层形成机理探讨——读马永生教授的《四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示》有感. 地质论评, 2006, 52(2): 46—50
- 张水昌, 梁狄刚, 张大江. 关于古生界烃源岩有机质丰度评价标准. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 8—12
- Moore C H. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. Developments in Sedimentology, 2001, 55: 1—423
- 邵龙义, 何红, 彭苏萍, 等. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系及奥陶系白云岩类型及形成机理. 古地理学报, 2002, 4(2): 19—30
- Davies G R, Smith J L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview. AAPG Bull, 2006, 90(11): 1641—1690
- 顾家裕, 贾进华, 方辉. 塔里木盆地储层特征与高孔隙度、高渗透率储层成因. 科学通报, 2002, 47(增刊): 9—15
- 康玉柱. 塔里木盆地寒武-奥陶系古岩溶特征与油气分布. 新疆石油地质, 2005, 26(5): 472—480
- 强子同. 碳酸盐岩储层地质学. 东营: 石油大学出版社, 1995
- Wierzbicki R, Dravis J J, Al-Aasm I, et al. Burial dolomitization and dissolution of Upper Jurassic Abenaki platform carbonates, Deep Panuke reservoir, Nova Scotia, Canada. AAPG Bull, 2006, 90(11): 1843—1861
- 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR 对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式. 岩石学报, 2006, 22(8): 2182—2194
- Machel H G, Krouse H R, Riciputi L R. Devonian Nisku sour gas play, Canada: A unique nature laboratory for study of thermochemical sulfate reduction. Geochemical Transformations of Sedimentary Sulfur, 1995, 612: 439—454
- Worden R H, Smalley P C. H_2S -producing in deep carbonate gas reservoirs: Khuff Formation Abu Dhabi. Chem Geol, 1996, 133: 157—171
- 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR(H_2S)对石油天然气工业的积极性研究—— H_2S 的形成过程促进储层次生孔隙的发育. 地学前缘, 2006, 13(3): 141—149
- Swarbrick R H, Osborne M J. Mechanisms that generate abnormal pressure: An overview. In: Law B E, Ulmishek G F, Slavin V, eds. Abnormal pressures in hydrocarbon environments. AAPG Memoir, 1998, 70: 13—34
- Barker C. Thermal modeling of petroleum generation: theory and application. Developments in Petroleum Science, 1996, 45, Elsevier, 512
- Ma Y S, Guo X S, Guo T L, et al. The Puguang gas field: New giant discovery in the mature Sichuan Basin, southwest China. AAPG Bull, 2007, 91(5): 627—643
- 王一刚, 刘划一, 文应初, 等. 川东北飞仙关组鲕粒滩储层分布规律、勘探方法与远景预测. 天然气工业, 2002, 22(增刊): 14—18
- 张水昌, 朱光有, 陈建平, 等. 四川盆地川东北部飞仙关组高含

- 硫化氢大型气田群气源探讨. 科学通报, 2007, 52(增刊 I): 86—94
- 23 王兴志, 张帆, 马青, 等. 四川盆地东部晚二叠世—早三叠世飞仙关期礁、滩特征与海平面变化. 沉积学报, 2002, 20(2): 249—254
- 24 马永生, 蔡勋育, 郭彤楼. 四川盆地普光大型气田油气充注与富集成藏的主控因素. 科学通报, 2007, 52(增刊 I): 149—155
- 25 朱光有, 张水昌, 李剑, 等. 中国高含硫化氢天然气田的特征及其分布. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 18—21
- 26 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律. 地质学报, 2005, 79(6): 858—865
- 27 马永生, 牟传龙, 郭旭升, 等. 四川盆地东北部长期沉积特征与沉积格局. 地质论评, 2006, 52(1): 25—29
- 28 Heydari E. Meteoric versus burial control on porosity evolution of the Smackover Formation. AAPG Bulletin, 2003, 87(11): 1779—1797
- 29 Halley R B, Schmoker J M. High-porosity Cenozoic carbonate rocks of South Florida: progressive loss of porosity with depth. AAPG Bull, 1983, 67: 191—200
- 30 Lucia F J. Carbonate Reservoir Characterization. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 1—226
- 31 Ayalon A, Longstaffe F J. Stable isotope evidence for the origin of diagenetic carbonate minerals from the Lower Jurassic Inmar Formation, Southern Israel. Sedimentology, 1995, 42(1): 147—160
- 32 Gao G, Land L S, Elmore R D. Multiple episodes of dolomitization in the Arbuckle Group, Arbuckle Mountains, south-central Oklahoma; field, petrographic, and geochemical evidence. J Sediment Res, 1995, A65(2): 321—331
- 33 朱如凯, 郭宏莉, 高志勇, 等. 中国海相储层分布特征与形成主控因素. 科学通报, 2007, 52(增刊 I): 40—45
- 34 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北地区飞仙关组高含 H_2S 天然气 TSR 成因的同位素证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(11): 1037—1046
- 35 Chellie S T, Mazzullo S J, Bischoff W D. Dolomitization of Holocene shallow-marine deposits mediated by sulfate reduction and methanogenesis in normal-salinity seawater, northern Belize. J Sediment Res, 2000, 70(3): 649—663
- 36 Radke B M, Mathis R L. On the formation and occurrence of saddle dolomite. J Sediment Petrol, 1980, 50(4): 1149—1168
- 37 Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. Earth-Sci Rev, 2000, 52: 181
- 38 Machel H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic setting—old and new insight. Sediment Geol, 2001, 140: 143—175
- 39 Moore C H, Heydari E. The role of burial diagenesis in hydrocarbon destruction and H_2S accumulation, Upper Jurassic Smackover Formation, Black Creek Field, Mississippian. AAPG Bull, 1997, 81: 26—45
- 40 朱光有, 张水昌, 梁英波. 中国海相碳酸盐岩气藏硫化氢形成的控制因素和分布预测. 科学通报, 2007, 52(增刊 I): 115—125
- 41 张水昌, 梁狄刚, 朱光有, 等. 中国海相油气田形成的地质基础. 科学通报, 2007, 52(增刊 I): 19—31
- 42 赵雪凤, 朱光有, 刘钦甫, 等. 深部海相碳酸盐岩储层孔隙发育主控因素研究. 天然气地球科学, 2007, 8(4): 514—521
- 43 马永生. 四川盆地普光超大型气田的形成机制. 石油学报, 2007, 28(2): 9—14
- 44 朱光有, 张水昌, 梁英波. 四川盆地深部海相优质储集层的形成机理及其分布预测. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 161—166
- 45 马永生, 郭彤楼, 朱光有, 等. 硫化氢对碳酸盐储层溶蚀改造作用的模拟实验证据——以川东飞仙关组为例. 科学通报, 2007, 52(增刊 I): 136—141
- 46 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北飞仙关组高含 H_2S 气藏特征与 TSR 对烃类的消耗作用. 沉积学报, 2006, 24(1): 79—85