

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

中下扬子二叠纪礁碳酸盐岩成岩作用、 孔隙演化及油气评价

沈安江 陈子料 陆俊明

(中国石油天然气总公司杭州石油地质研究所)

内容提要 本文提出中下扬子二叠纪礁碳酸盐岩主要成岩作用类型有造礁作用、白云石化作用、胶结作用、溶解作用及裂隙作用;经历了海水、混合水、大气淡水及埋藏成岩环境;按下列序列演化:造礁作用—海水胶结作用—蒸发海水白云石化—淡水渗流带淋溶及潜流带胶结作用—混合水白云石化—浅埋Ⅰ胶结、白云化及溶解作用(T_1/P_2)的多期交替—深埋藏胶结(含 J_3/J_2 古表生构造岩溶作用)—深埋藏溶解—深埋藏白云石化—浅埋藏Ⅱ及表生淋溶胶结作用。在此基础上恢复成岩地质体的孔隙演化史,并以构造演化为主线,“三史”配置为核心,对礁碳酸盐岩油气勘探潜力进行评价,指出可能有二期配置关系,即印支—燕山期和喜马拉雅期的“三史”配置。

关键词 中下扬子 礁碳酸盐岩 孔隙演化 油气评价 “三史”配置

目前已证实的中下扬子二叠纪露头礁有六处。其中湖南辰溪长兴期海绵礁为浅水碳酸盐台地内的点礁群,浙江桐庐冷坞茅口期海绵礁为碎屑陆棚上的孤立点礁,江西修水及无锡嵩山长兴期海绵礁为沿台地边缘展布的堤礁,安徽铜陵茅口期叶状藻礁及湖南郴州长兴期海绵礁为台盆内孤立碳酸盐隆起上的点礁或点礁群。

1 成岩作用基本类型

中下扬子二叠纪礁碳酸盐岩成岩作用类型齐全,但对孔隙改造起主导作用的只有造礁作用、白云石化作用、胶结作用、溶解作用和裂隙作用^[1]。

1.1 造礁作用

造礁作用^[2]主要包括造架作用、障积作用及粘结-包覆作用。

造架作用 以湖南辰溪及郴州长兴期海绵礁为典型。海绵骨架岩由格架系统及孔洞系统组成,造礁生物(串管海绵、纤维海绵、水螅和 Tabulozoa Chaetes 等)构成格架系统,孔洞系统中发育栉壳状构造(图1;图版 I-1,2)。

障积作用 主要见于安徽铜陵茅口期叶状藻礁及江西修水长兴期海绵礁中。前者叶状藻障积灰泥构成叶状藻障积岩(图版 I-3),叶状藻以平卧生长为主,但局部可见叶状藻与层面呈斜交或垂直的生态特征。后者由障积生物串管海绵、纤维海绵障积灰泥构成海绵障积岩,另见少量起障积作用的水螅及苔藓,障积生物具有与层面呈斜交或垂直的生态特征。

粘结-包覆作用 以浙江桐庐冷坞茅口期海绵礁为代表。造礁生物海绵、水螅和苔鲜虫几

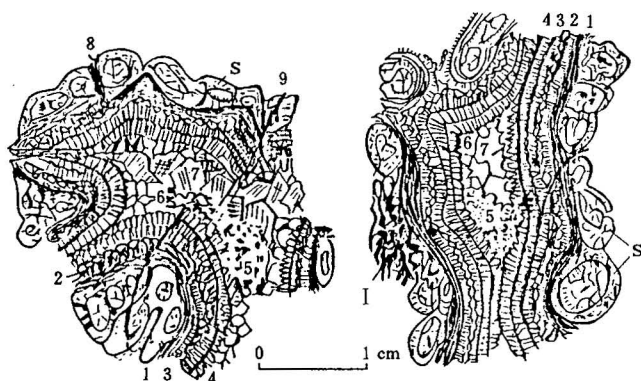


图1 郴县华塘大排冲生物礁骨架孔隙的胶结
世代及微观组构特征描述

Fig. 1 Showing the cements generation and its microfabric
in reef-framework pore space, located in
Huatang Dapaichong Chengxian

- S—串管海绵; I—纤维海绵; 1—古石孔藻壳; 2—纤维状方解石胶结物;
3—等厚环边白云石胶结物; 4—放射状方解石胶结物; 5—内沉积物;
6—等粒状细晶方解石胶结物; 7—粗一块晶方解石胶结物; 8. 张裂隙;
9—压碎裂隙、微错位
S—Sphinctozoan; I—Inozoa; 1—encruster *Archaeolithoporella*;
2—fibrous calcite rim cements; 3—ispachous dolomite rim cements;
4—radiated calcite cements; 5—internal sediments; 6—finely
crystalline equant calcite cements; 7—coarsely-blockily
crystalline calcite cements; 8—extension fracture;
9—pressure fracture

乎毫无例外地被古石孔藻(*Archaeolithoporella*)及其他蓝绿藻包覆构成坚固的骨架,但缺乏栉壳状构造。粘结生物蓝绿藻(主要为古石孔藻)粘结灰泥可形成直径几个厘米的微型灰泥丘。

1.2 白云石化作用

依据白云石产状及其地球化学特征,中下扬子二叠纪生物礁灰岩主要有三期白云石化作用,由早到晚依次为准同生期白云石化、埋藏中期白云石化及埋藏晚期白云石化。

准同生期白云石化 其机理为混合水白云石化及蒸发海水白云石化(图版 I-4)。江西修水长兴期礁灰岩混合水白云石化所形成的白云石呈扁平透镜状或不连续的薄层顺层分布。湖南郴州长兴期礁灰岩蒸发海水白云石化所形成的白云石呈等厚薄层环边状夹于纤维状和放射状方解石胶结物之间,在抛光面上呈白色细线,极其醒目。上述白云石均为泥粉晶级(0.08—0.1mm),它形晶镶嵌状接触。阴极发光下极暗或几乎不发光。 Fe^{2+} 含量远大于 Mn^{2+}

含量, $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=2.31\%$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-9.75\%$ 。

埋藏中期白云石化 这期白云石化(图版 I-5)在中下扬子二叠纪礁灰岩中普遍存在,主要表现为造礁生物的选择性白云石化,早中期亮晶方解石胶结物为白云石交代。白云石菱面体细—中晶级具有较高的自形程度,呈零星状散布于礁灰岩中。阴极发光下呈暗玫瑰紫红色。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}=2.49$, $\text{Sr}^{2+}/\text{Ba}^{2+}=1.41$, $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=2.28\%$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-11.20\%$ 。

埋藏晚期白云石化 见于中下扬子二叠纪长兴期礁灰岩中(图版 I-6),充填于裂隙及埋藏溶孔中,以粗晶鞍状白云石形式产出,具波状消光及弯曲的晶面和解理面。阴极发光下呈亮玫瑰红色。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}=1.52$, $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=1.90\%$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-14.17\%$,包裹体均一温度为 150°C ,反映形成深度至少在5000m以下。

上述三期不同成因白云石特征表明:早期白云石晶粒细小(泥粉晶),自形程度差(它形晶),晚期白云石晶粒粗大(中—粗晶),自形程度好(菱面体);早期白云石发光弱或不发光,晚期白云石发光较强,这与 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$ 值随白云石化由早到晚呈递减趋势有关^[3]; $\delta^{13}\text{C}$ 为低正值,且变化不大, $\delta^{18}\text{O}$ 随白云石化由早到晚有向高负值变化的趋势^[4]。

白云石化作用是一种重要的孔隙建造作用,世界上许多碳酸盐岩油气藏均与白云石化作用有关,研究区内二叠纪生物礁灰岩对改善储集物性有较大贡献的白云石化作用为第一期(图版Ⅱ-1)。

1.3 胶结作用

依据胶结物产状(形态、分布样式及胶结序次)、包裹体均一温度、微量元素、氧碳稳定同位素及阴极发光特征,中下扬子二叠纪生物礁灰岩胶结作用至少可识别出七个期次,但这些期次在同一礁体中不一定同时出现。

等厚环边纤状方解石胶结物 普遍见于各礁体的格架孔、粒间孔及生物体腔孔中(图版Ⅱ-2)。纤状方解石单个晶体宽0.06—0.08mm,长0.4—0.8mm,呈等厚环边状垂直生物体腔孔的内壁或颗粒的外壁生长。晶体具波状消光,阴极发光下不发光。富 Fe^{2+} 贫 Mn^{2+} , $\text{Sr}^{2+}/\text{Ba}^{2+}=0.67$, $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=1.03\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-9.37\text{‰}$,形成于海水成岩环境。

细粒它形嵌晶方解石胶结物 见于安徽铜陵茅口期叶状藻礁及江西修水长兴期海绵礁生物体腔孔、粒间孔及次生溶孔中(图版Ⅱ-3),与纤状亮晶方解石呈溶蚀不整合接触。细晶级它形一半自形,由孔隙边缘向中央粒径逐渐增大,阴极发光下不发光。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}=2.39$, $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=0.8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-13.61\text{‰}$,形成于早期大气淡水成岩环境。

放射状方解石胶结物 仅见于湖南郴州长兴期海绵礁格架孔中,形成栉壳状构造。发育较好者有2—5层,层间显示溶蚀间断,单层厚1—3mm。通常盖在等厚环边白云石或纤状方解石胶结物之上,二者间溶蚀不整合。放射状方解石单个晶体宽0.3—0.5mm,长1.6—2.2mm。晶体终端呈 45° — 80° 锐角,一组或二组菱形解理发育,解理面呈弧形弯曲,波状消光,阴极发光下呈暗橙色或不发光。 Mg^{2+} 含量3.41%, Sr^{2+} 含量1.46%, $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=1.75\text{‰}$ — 2.47‰ , $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-3.73\text{‰}$ — -8.55‰ ,形成于浅埋藏成岩环境(图2,浅埋藏Ⅰ)。

等轴粒状细—中晶方解石胶结物 普遍见于各礁体的格架孔、粒间孔及次生溶孔中(图版Ⅱ-4)。晶粒大小为0.12—0.6mm,呈它形一半自形直接覆盖纤状或放射状方解石胶结物之上。阴极发光下呈黑褐色或深褐色。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}=3.06$, $\text{Sr}^{2+}/\text{Ba}^{2+}=1.55$, $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=3.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-9.25\text{‰}$ 。包裹体均一温度具2个峰值(50°C 和 90°C),为浅埋藏成岩环境的产物^[5](图2,浅埋藏Ⅰ)。

等轴粒状粗晶方解石胶结物 普遍见于各礁体的格架孔、粒间孔、次生溶孔及裂隙中。粒径0.7mm±,晶体间呈镶嵌状接触,接触界面平直,由孔隙边缘向中央晶粒逐渐变粗。阴极发光下呈暗红褐色或暗紫色。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}=0.78$, $\text{Sr}^{2+}/\text{Ba}^{2+}=6.45$, $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=3.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-12.6\text{‰}$,形成于深埋藏成岩环境。

粗晶—块晶方解石胶结物Ⅰ 普遍见于生物礁灰岩的裂隙及次生溶孔中。显微镜下观察粒径达0.6—4mm,手标本中最大可达20mm,为洁净明亮的晶体且多为自形晶。阴极发光下方解石具环带构造。不发光环带 $\text{Fe}^{2+}=693\times 10^{-6}$,不含 Mn^{2+} 。发光环带 $\text{Mn}^{2+}=780\times 10^{-6}$,不含 Fe^{2+} 。 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=3.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-13.4\text{‰}$,均一温度为 90°C ,形成于浅埋藏成岩环境。但这是成岩地质体由深埋藏向地表近地表回反过程中的浅埋藏^[5](图2,浅埋藏Ⅱ)。

粗晶—块晶方解石胶结物Ⅱ 普遍见于礁灰岩的次生溶孔中,为最末一期亮晶方解石胶结物。自形晶解理纹发育,阴极发光下呈亮黄色。 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})=2.14\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})=-17.78\text{‰}$,常温包体,形成于晚期大气淡水成岩环境。

胶结作用使礁灰岩大量的原生孔隙和次生孔隙遭到破坏,岩石现有平均孔隙度 $<1\%$ 。

1.4 溶解作用

中下扬子二叠纪生物礁灰岩至少可识别出四期溶蚀事件(表 1,图版Ⅱ-3,5),分别为早期大气淡水渗流带溶蚀事件,浅埋藏溶蚀事件,深埋藏有机溶蚀事件及晚期大气淡水淋溶事件,但上述溶蚀事件在同一礁体中不一定同时出现。

溶解作用是非常重要的孔隙建造作用,产生的次生溶孔可大大地改善岩石的储集性能,尤其是深埋藏有机溶蚀事件,往往与油气运移同步,是很有意义的油前孔隙,沥青大多充填于由溶解作用所形成的次生溶孔中。

表 1 中下扬子二叠纪生物礁灰岩溶蚀事件期次及特征对比
Table 1 The stages of dissolution events and characteristic comparison
from Permian reef limestones in middle and lower Yangtze area

	溶 解 期 次	产 状	产 地
溶 解 作 用	早期大气淡水渗流带溶蚀事件	形成的次生溶孔小(几毫米),形态不规则或呈单向延长状近于垂直层面,其中充填等轴细粒它形亮晶方解石,并与早期纤状方解石呈溶蚀不整合接触,在孔隙中央见渗滤粉砂	浙江桐庐(P _{1m}) 江西修水(P _{2c})
	浅埋藏溶蚀事件	沿海绵体中央腔及周缘发生选择性溶蚀作用,多期次的浅埋藏胶结物间呈溶蚀不整合接触,甚至缺失早期胶结物	普遍见于各礁体中
	深埋藏有机溶蚀事件	颗粒组分被溶蚀成港湾状,粒间孔中充填的亮晶方解石也被溶解,仅在颗粒周缘能见到少量残留、形成的次生溶孔为沥青所充填	江西修水(P _{2c}) 湖南郴州(P _{2c}) 安徽铜陵(P _{1m})
	晚期大气淡水淋溶事件	形成的次生溶孔具有较大的孔径(0.5—1cm)和不规则的形态,并往往沿裂缝和缝合线发育,粗—巨晶方解石充填	普遍见于各礁体中

1.5 裂隙作用

裂隙作用对碳酸盐岩储集性能的改善具有积极的意义,其最大的贡献在于连通孔隙,提高岩石的渗透性,世界上许多碳酸盐岩油气藏均与裂隙储油有关。依据裂隙的产状及相互交割关系、裂隙自身特征及其中充填的亮晶方解石地球化学特征,中下扬子二叠纪生物礁灰岩至少可识别出四期裂隙,而且普遍见于各礁体中(表 2,图版Ⅱ-6)。

2 成岩环境及特征

成岩环境的识别主要依据成岩产物的特征,如胶结物的形态、分布样式、相互接触和交代关系,包裹体均一温度、微量元素、氧碳稳定同位素及阴极发光等特征^[6]。

中下扬子二叠纪露头生物礁灰岩普遍经历了海水成岩环境、浅埋藏成岩环境、深埋藏成岩环境及晚期大气淡水成岩环境,安徽铜陵茅口期叶状藻礁及江西修水长兴期海绵礁还经历了早期大气淡水成岩环境。混合水及蒸发海水作为白云石化作用非常重要的成岩环境可见于湖南郴州及江西修水长兴期礁灰岩中。

2.1 海水成岩环境

成岩介质为海水,而且相对于绝大多数碳酸盐矿物相是过饱和的,所以几乎没有形成次生孔隙的潜力,主要通过胶结作用破坏孔隙。所有的造礁作用都是在海水成岩环境中发生的,继之发生的等厚环边纤状方解石胶结物充填于礁格架孔及粒间孔中。成岩产物富铁贫锰,阴极发光弱或不发光。 $Sr^{2+}/Ba^{2+}<1$, $\delta^{13}C$ 低正值, $\delta^{18}O(PDB)=-8‰\pm$ 。 $\delta^{18}O$ 与二叠纪海水平均值相比明显偏负,这可能与后期成岩改造叠加有关。

表 2 中下扬子二叠纪礁灰岩裂隙作用期次及特征对比
Table 2 The stages of fracturing events and characteristic comparison
from Permian reef limestones in middle and lower Yangtze area

特 期 次	裂 隙 特 征	裂隙充填物地球化学特征					成 因 解 释
		$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	Fe^{2+}/Mn^{2+}	包裹体均一温度	阴极发光	
成 岩 裂 隙	裂隙Ⅰ	低负值	低正或低负值、变化不大	<1 发光环带不含 Fe^{2+} 不发光环带不含 Mn^{2+}	150℃ 200℃ 100℃	不发光	沉积物脱水作用形成的成岩收缩缝
构 造 裂 隙	裂隙Ⅱ					发光无环带	地静压力与构造应力共同作用形成的扭性裂隙
	裂隙Ⅲ					发光具环带	
	裂隙Ⅳ						构造抬升过程中形成的张性裂隙

2.2 蒸发海水成岩环境

在气候干燥、蒸发作用强烈的情况下,可导致成岩介质的咸化和高 Mg^{2+}/Ca^{2+} 值的重盐水形成。湖南郴州海绵礁骨架孔中夹于纤状和放射状方解石胶结物之间的薄层白云石就是海水蒸发作用的产物,并见石膏和硬石膏的交代作用与这期白云石伴生。白云石化可导致白云石晶间孔的形成,膏盐沉积对晶间孔起封闭和保护作用。同时膏盐沉积物也易于溶解形成次生孔隙,这是非常有利于储层发育的成岩环境。

2.3 混合水成岩环境

发育于海水和大气淡水的过渡带。如区域大气淡水含水层向海岸方向与海水的过渡带;漂浮在海面上的大气淡水透镜体与海水的过渡带。江西修水海绵礁灰岩混合水白云石化所形成的白云石呈扁平透镜状或不连续的薄层顺层分布,白云石晶间孔隙度达 10%,具有很大的孔隙建造潜力。

2.4 大气淡水成岩环境

又可划分为早期大气淡水成岩环境及晚期大气淡水成岩环境。

早期大气淡水成岩环境 沉积物因海平面升降的影响可间歇性暴露于地表并受大气淡水成岩作用的影响,由于刚从海水中沉淀的碳酸盐矿物主要为准稳定的文石和高镁方解石,在淡水渗流带很容易溶解形成次生溶孔。进入潜流带的成岩介质因上覆准稳定碳酸盐矿物的溶解而趋于饱和,沉淀作用随之发生并充填孔隙。所以早期大气淡水成岩环境具孔隙建造的潜力,又具孔隙破坏的潜力,渗流带溶解作用形成的次生溶孔较小(几毫米),形态不规则或呈单向延长状近于垂直层面,潜流带沉淀作用形成的亮晶方解石充填生物体腔孔、粒间孔及次生溶孔中,细粒它形,镶嵌状接触,由孔隙边缘向中央粒径逐渐增大。阴极发光下不发光。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+} > 1$, $\delta^{13}\text{C}$ 低正值, $\delta^{18}\text{O}$ 高负值 ($\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) = -14 \pm \text{‰}$)。

晚期大气淡水成岩环境 岩石受构造应力的作用抬升至地表、近地表,再次接受大气淡水成岩作用的影响。此时淡水介质所作用的对象已非准稳定的碳酸盐沉积物,而是已固化和稳定化的岩石,所以溶解作用主要受裂隙及缝合线控制,形成沿裂隙和缝合线发育的扩大的次生溶孔。如果受大断裂控制,还可形成大型的古卡斯特溶洞。寻找地质历史时期古卡斯特面对储层预测具有非常重要的意义。晚期大气淡水胶结物主要充填于大型的溶孔溶洞中,粗晶—巨晶状自形晶方解石解理纹发育,阴极发光下呈亮黄色。 $\delta^{13}\text{C}$ 低正值, $\delta^{18}\text{O}$ 高负值 ($\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) = -17 \pm \text{‰}$), 常温包体。

2.5 浅埋藏成岩环境

包括沉积物逐渐深埋(浅埋藏 I)和碳酸盐岩地层因构造抬升由深埋又逐渐变浅(浅埋藏 II)两个过程。

浅埋藏 I 成岩介质为封存水或区域地下水。区域地下水相对于准稳定碳酸盐矿物相是不饱和的,还存在准稳定碳酸盐矿物相向稳定碳酸盐矿物的转化,所以溶解作用较为发育,并具有多期性。浅埋藏胶结物有放射状及等轴细粒状亮晶方解石两种,阴极发光弱(黑褐色或褐色)。具有较高的 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$ 值及 $\text{Sr}^{2+}/\text{Ba}^{2+}$ 值, $\delta^{13}\text{C}$ 低正值, $\delta^{18}\text{O}$ 中高负值 ($\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) = -10 \pm \text{‰}$), 包裹体均一温度为 50°C 和 90°C 。白云石化作用主要表现于细—中晶白云石菱面体选择性交代生物组分及早中期亮晶方解石胶结物。白云石菱面体阴极发光下呈暗玫瑰紫红色。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$ 值、 $\text{Sr}^{2+}/\text{Ba}^{2+}$ 值与同期方解石的值相近,但 $\delta^{18}\text{O}$ 却明显偏轻 ($\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) = -11.20 \text{‰}$)。

浅埋藏 II 成岩介质主要为沿裂缝或缝合线下渗的大气淡水,以裂隙作用及裂隙溶解、充填作用为特征。充填裂隙的亮晶方解石发光并具环带构造,不发光环带富 Fe^{2+} , 发光环带富 Mn^{2+} , 这种环带构造是下渗的大气淡水与封存水不断交替的产物。 $\delta^{13}\text{C}$ 低正值, $\delta^{18}\text{O}$ 高负值 ($\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) = -15 \text{‰}$), 包裹体均一温度为 $70\text{—}110^\circ\text{C}$ 。

2.6 深埋藏成岩环境

成岩介质为富含金属阳离子的盆地卤水及烃成熟或热解过程中形成的有机酸,温度高、压力大。压溶作用除形成大量的缝合线外,还为深埋藏胶结物提供了物源。白云石化作用主要表现于鞍状白云石充填裂隙及次生溶孔。深埋藏溶解作用为有机酸侵蚀所致,形成的次生溶孔往往为沥青所充填,是比较有意义的油前孔隙。深埋藏成岩环境形成的亮晶方解石发光较强(红褐色或紫色)。贫 Fe^{2+} , Sr^{2+} ; 富 Mn^{2+} , Ba^{2+} ; $\delta^{13}\text{C}$ 低正值, $\delta^{18}\text{O}$ 高负值 ($\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) = -12 \pm \text{‰}$), 包裹体均一温度 $150\text{—}270^\circ\text{C}$ 。

综上所述,不同成岩环境的成岩产物不但具有不同的形态特征,而且还具有不同的地球化学特征并具明显的趋势性^[3-5],这种趋势性可划分为二个过程。一是沉积物由地表、近地表逐

渐进入深埋藏的过程;二是岩石由深埋藏逐渐被抬升至地表、近地表的过程。在第一过程中,成岩产物富 Fe^{2+} 贫 Mn^{2+} , 阴极发光普遍较弱但有逐渐增强的趋势,包裹体均一温度逐渐升高,碳同位素变化不大,氧同位素受温度效应的控制逐渐向中高负值滑移。图 2 为中下扬子二叠纪生物礁由成岩早期至成岩晚期, $\delta^{18}\text{O}$ 具逐渐偏负的趋势, $\delta^{13}\text{C}$ 变化不大,其中 AB 段代表礁体连续被埋藏的温度效应导致氧同位素向负值滑移,CD 段代表礁体构造抬升回反过程中介质效应(大气淡水效应)导致氧同位素向高负值滑移,EF 段是由于受早期大气淡水的影响导致氧

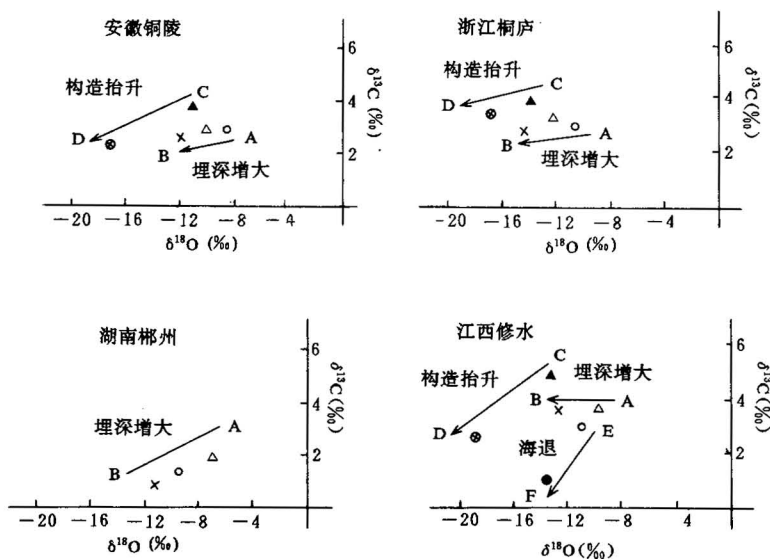


图 2 中下扬子二叠纪生物礁 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ 分布图

Fig. 2 The trend of oxygen and carbon stable isotope from Permian reefs in middle and lower Yangtze area

○—海水成岩环境; ●—大气淡水 I; ⊗—大气淡水 II; △—浅埋 I; ▲—浅埋 II; ×—深埋成岩环境
○— Marine diagenetic environment; ●— meteoric fresh water diagenetic environment I; ⊗— meteoric fresh water diagenetic environment II; △— shallow burial diagenetic environment I; ▲— shallow burial diagenetic environment II; ×— deep burial diagenetic environment

同位素偏负值。在第二过程中,成岩产物贫 Fe^{2+} 富 Mn^{2+} , 阴极发光普遍较强并具环带构造,包裹体均一温度逐渐降低,碳同位素变化不大,氧同位素受介质效应的控制向更高的负值滑移。

3 成岩序列及孔隙演化

成岩地质体孔隙演化史的恢复必须解决二个问题:一是成岩序列,即叠加于同一成岩地质体的各类成岩作用发育的序次;二是成岩作用对孔隙改造的效应。据此可将成岩作用划分为建设性成岩作用(形成孔隙)和破坏性成岩作用(破坏孔隙)。中下扬子二叠纪生物礁灰岩主要的建设性成岩作用有准同生期白云石化作用,贯穿于整个成岩历史的多期溶解作用及裂隙作用。主要的破坏性成岩作用有贯穿于整个成岩历史的多期胶结作用、准同生后白云石化作用、压实-压溶作用。

中下扬子区构造演化大致可分为三个阶段:P—T₂ 的海相盆地发育阶段,持续的海相沉积

使礁体逐渐被埋藏,但 T_1/P_2 之交的假整合接触反映二叠纪礁体有过短暂的古表生作用,浅埋藏溶蚀事件多半与这次古表生作用有关; T_3-K 的陆相盆地发育阶段,海水大面积退却,以河湖相沉积为特征,印支—燕山运动主要以褶皱运动为主,可以说中下扬子区的褶皱基本上是以三叠系或更新的地层为核心的印支—燕山期的产物,褶皱及剥蚀导致二叠纪礁体再次处于古表生构造岩溶背景(J_3/J_2); $E-Q$ 的陆相断陷盆地发育阶段,受断裂活动的影响,二叠纪礁体有的目前仍处于中生代陆相盆地之下,有的则被抬升暴露于地表。由此可知中下扬子二叠纪露头礁经历的成岩序列大致为:造礁作用—海水胶结作用(纤状方解石)—蒸发海水白云石化—淡水渗流带淋溶及潜流带胶结作用—混合水白云石化—浅埋 I 胶结、浅埋 I 白云石化及浅埋 I 溶解作用(T_1/P_2)的多期交替—深埋藏胶结(含 J_3/J_2 古表生构造岩溶背景的溶解作用)—深埋藏溶解—深埋藏白云石化—浅埋藏 II 及表生淋溶胶结作用。

依据成岩序列及成岩作用对孔隙改造的效应,可定性地恢复中下扬子二叠纪礁灰岩的孔隙演化史(图 3)。由图 3 还可以看出中下扬子二叠纪潜伏礁至少有三次孔隙高峰期:成岩早期的蒸发海水白云石化,混合水白云石化及淡水渗流带淋溶可形成大量的次生溶孔,加上未被充填的原生孔隙,其孔隙度高达 30%—40%; T_1/P_2 之交的古表生溶蚀导致第二孔隙高峰期的形成,由于经浅埋藏胶结后大量原生孔隙的丧失,其孔隙度低于 10%;印支—燕山期深埋藏有机溶蚀作用, J_3/J_2 之交的古表生岩溶作用导致第三孔隙高峰期的到来,其孔隙度高达 10%—15%,并大多为沥青充填,是中下扬子二叠纪生物礁灰岩最有意义的油前孔隙。

无论是潜伏礁还是露头礁,喜马拉雅期之前的成岩历程是相同的,根据露头礁推测潜伏礁喜马拉雅期之前的孔隙演化是可行的。但进入喜马拉雅期后,两者成岩历程完全不同,要恢复中下扬子二叠纪潜伏礁在喜马拉雅期的孔隙演化史还需对礁灰岩钻井资料进行研究。

4 “三史”分析及油气评价

油气评价要以构造演化为主线,“三史”配置为核心(即成岩作用与孔隙演化史、埋藏—构造发展史、烃源岩及有机质演化史),后期改造、保存条件为研究关键。

成岩—孔隙演化史研究显示中下扬子二叠纪生物礁在其成岩过程中曾发育过良好的储集空间,具体表现在上述三次孔隙高峰期。埋藏—构造发展史的研究揭示中下扬子二叠纪生物礁可能存在二种圈闭类型:生物礁型背斜圈闭。生物礁沿背斜的核部呈串珠状分布,形成于印支—燕山褶皱期;生物礁型断层圈闭。生物礁沿断裂带呈串珠状分布,形成于喜马拉雅期断块运动。就目前所见的中下扬子二叠纪生物礁几乎毫无例外地沿褶皱的核部或断裂带呈串珠状分布就是非常有力的证据。烃源岩及有机质演化史的研究揭示中下扬子二叠纪生物礁储集层不外乎有以下二个油源:(1)加里东期油气藏。加里东期油气藏的区域生油岩为上震旦统陡山沱组,下寒武统水井沱组、荷塘组、黄柏岭组、高家边组、安吉组,下奥陶统宁国组及下志留统龙马溪组。印支—燕山期褶皱运动及喜马拉雅期断块运动可使加里东期油气藏遭受破坏,发生油气的重新运移和分布,并可分别向印支—燕山期生物礁型背斜圈闭及喜马拉雅期生物礁型断层圈闭提供油源;(2)石炭系、二叠系及下三叠统生油岩在不同的构造单元其成熟高峰期不同,在持续沉降幅度较大的地区,印支—燕山期即可进入成熟高峰期,并向生物礁型背斜圈闭提供油源,在沉降幅度较小或频繁隆起区,喜马拉雅期可进入成熟高峰期,并向生物礁型断层圈闭提供油源。

综上所述,中下扬子二叠纪生物礁可能存在二期配置关系(图 3),礁灰岩中赋存的沥青也

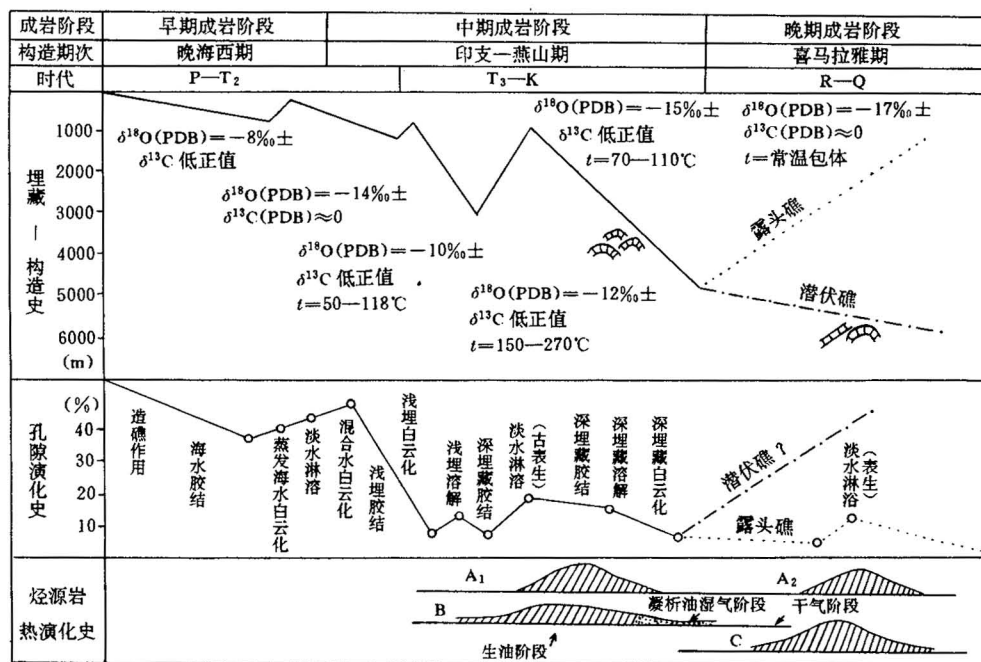


图3 中下扬子二叠纪生物礁及组合碳酸盐岩“三史”配置关系图

Fig. 3 Showing the timing of trap-forming, porosity evolution and thermal evolution of organic material from Permian reef carbonate rocks complexes in middle and lower Yangtze area

暗示着这两类配置关系的存在。(1)印支—燕山期的“三史”配置:深埋藏有机溶蚀作用及J₃/J₂之交的古表生岩溶作用所产生的大量次生孔隙,印支—燕山期褶皱运动形成的生物礁型背斜圈闭,加里东期油气藏及石炭系—二叠系—三叠统生油岩提供油源(图3中的A₁和B),它们构成印支—燕山期的“三史”配置关系;(2)喜马拉雅期的“三史”配置:印支—燕山期残留的次生孔隙及喜马拉雅期新产生的次生孔隙,喜马拉雅期断块运动形成的生物礁型断层圈闭,加里东期油气藏及石炭系—二叠系—三叠统生油岩提供油源(图3中的A₂和C),它们构成喜马拉雅期的“三史”配置关系。

总之,中下扬子二叠纪生物礁不但存在多期的“三史”配置,中新生代陆相盆地的发育也提供了极为有利的保存条件,应该具有良好的油气勘探潜力。

参 考 文 献

- 1 王英华,黄志诚,王国忠,梁百和. 中下扬子区海相碳酸盐岩成岩作用研究. 北京:科学技术文献出版社,1990. 336 页.
- 2 Fagerstrom J A. The Evolution of Reef Communities. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1987. 471.
- 3 王英华,张绍平,潘荣胜. 阴极发光技术在地质科学中的应用. 北京:地质出版社,1990. 104 页.
- 4 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用. 西安:陕西科学技术出版社,1983. 267 页.
- 5 卢焕章,李秉伦,沈昆,赵希微,喻铁阶,魏家秀. 包裹体地球化学. 北京:地质出版社,1990. 242 页.
- 6 Clyde H. Moore, Carbonate Diagenesis and Porosity. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1989. 284.

DIAGENESIS, POROSITY EVOLUTION AND PETROLEUM EVALUATION OF PERMIAN REEF CARBONATE ROCKS IN THE MIDDLE AND LOWER YANGTZE AREA

Shen Anjiang, Chen Ziliao and Lu Junming

(Hangzhou Institute of Petroleum Geology, CNPC, Hangzhou, Zhejiang)

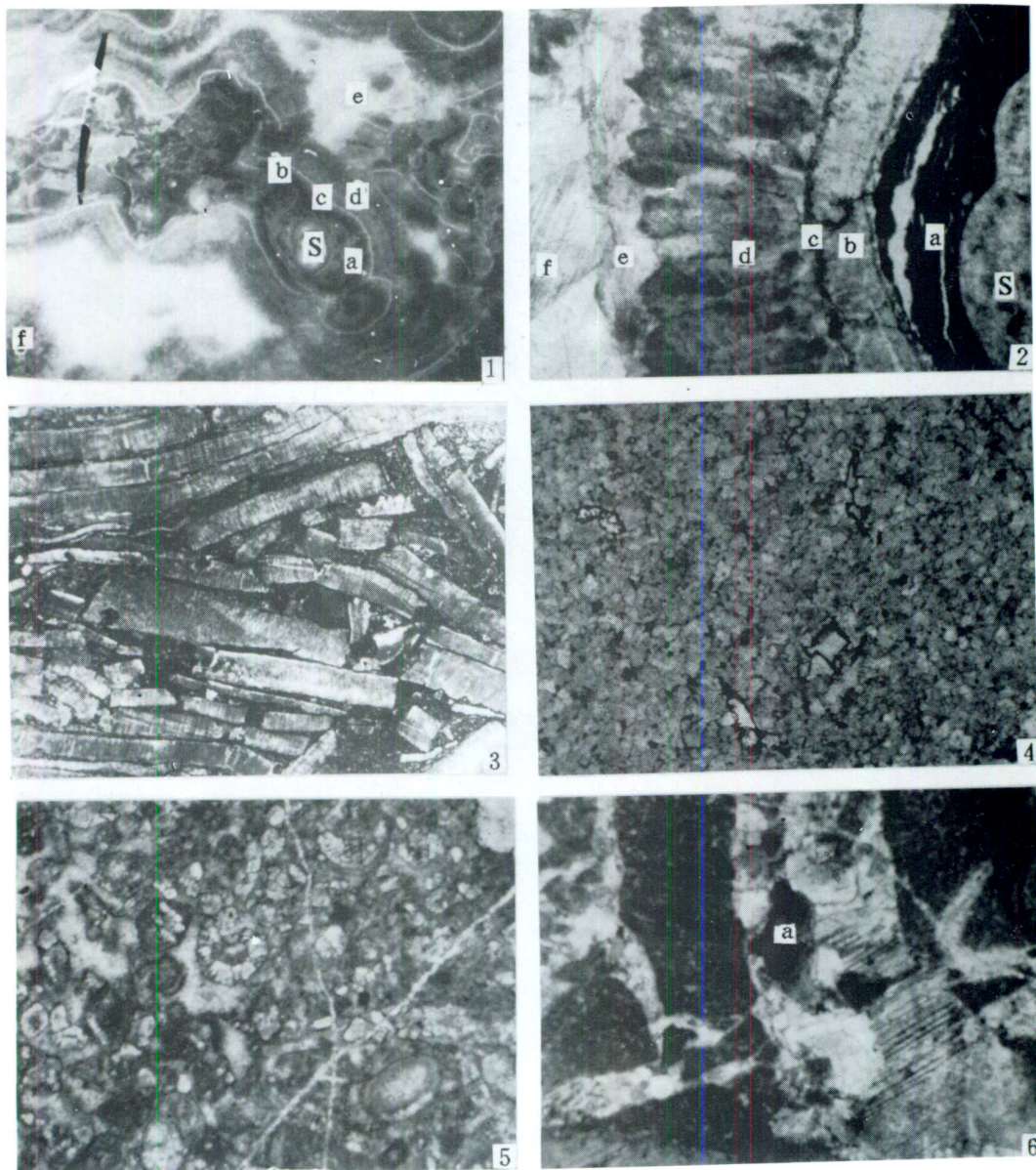
Abstract

Reef-building processes, dolomitization, cementation, dissolution and fracturing could be recognized from Permian reef carbonate rocks in the middle and lower Yangtze area. The Permian reef carbonate rocks have undergone marine diagenetic environment, evaporative marine diagenetic environment, meteoric water-seawater mixing diagenetic environment, meteoric water diagenetic environment and burial diagenetic environment. The diagenetic sequence of the Permian reef carbonate rocks is as follows: reef-building processes → marine cementation → evaporative marine dolomitization → dissolution in the meteoric vadose zone and cementation in the meteoric phreatic zone → meteoric water-seawater mixing dolomitization → alternation of shallow burial (I) cementation, dolomitization and dissolution (T_1/P_2) → deep burial cementation (including J_3/J_2 paleokarstification) → deep burial dissolution → deep burial dolomitization → dissolution and cementation in shallow burial (II) and supergene leaching and cementation. Based on the above studies porosity evolution of the Permian reef carbonate rocks have been reconstructed. Furthermore, the potential of petroleum exploration of the Permian reef carbonate rocks has been evaluated according to the tectonic evolution and a comprehensive study of dynamic matching, which suggests that in the Indosinian-Yanshanian period and Himalaya period there might exist favorable petroleum migration, accumulation and preservation.

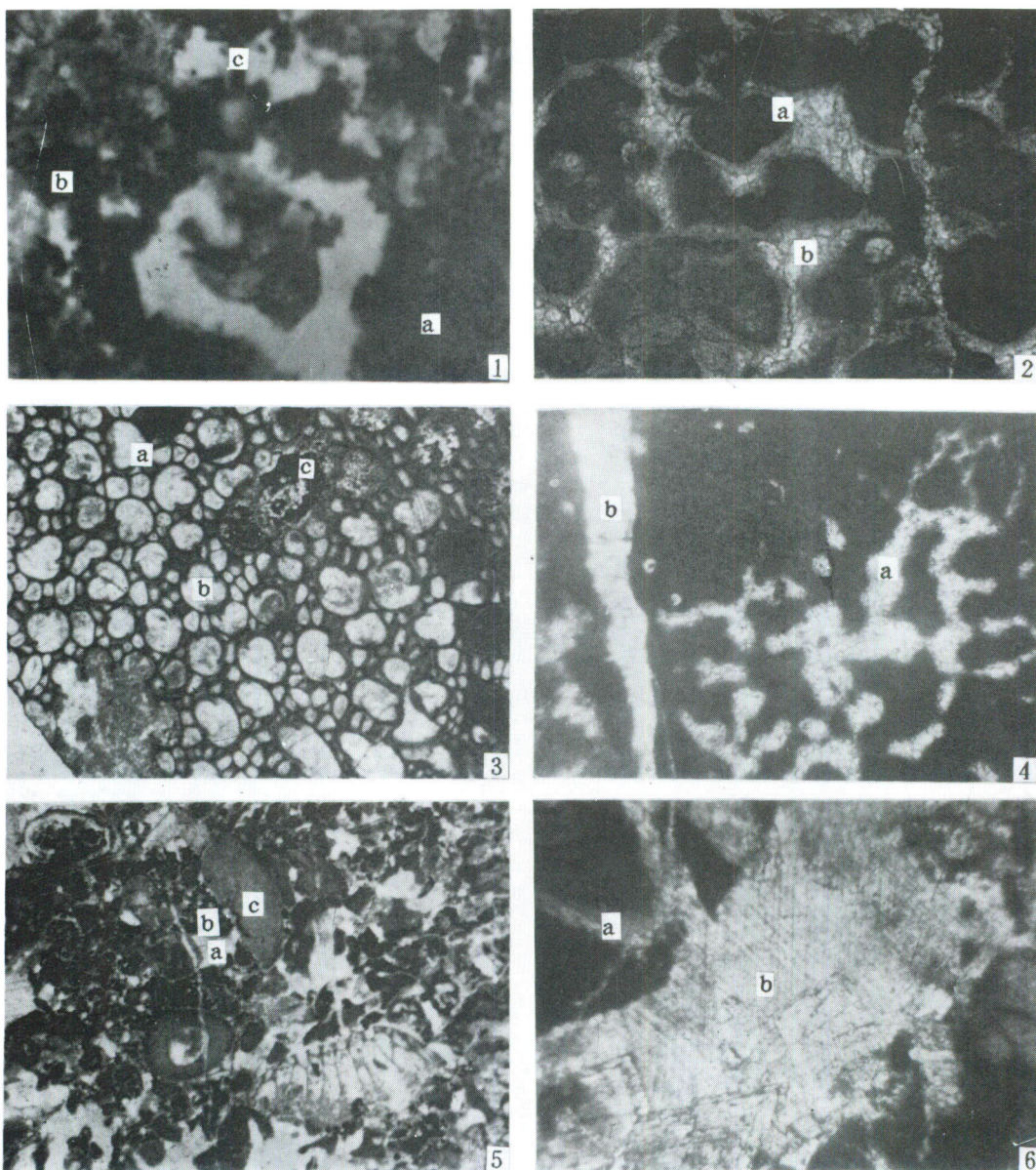
Key words: middle and lower Yangtze area, reef carbonate rocks, porosity evolution, petroleum evaluation, timing of trap-forming, porosity evolution and thermal evolution of organic material

作者简介

沈安江,男,生于1965年7月。1987年毕业于中国地质大学(武汉)地层古生物专业,1990年毕业于中国地质大学(北京)沉积学及古地理学专业。现为中国石油天然气总公司杭州石油地质研究所工程师,从事碳酸盐岩沉积、成岩的研究。通讯处:杭州市西溪路166—1号,石油地质研究所,邮政编码:310023。



1. 海绵骨架岩, 示骨架与胶结物结构。S 钝管海绵 (*Amblysiphonella*); a 古石孔藻 (*Archaeolithoporella*) 结壳; b 纤维状方解石胶结物; c 等厚白云石环边胶结物; d 放射状方解石胶结物; e 块晶方解石胶结物; f 内沉积物。P_{2c}, 湖南郴县大排冲, D-P-D-12-3, 光面, ×1。
2. 海绵骨架岩, 示胶结物结构。S 钝管海绵 (*Amblysiphonella*); a 古石孔藻 (*Archaeolithoporella*) 结壳; b 纤维状方解石胶结物; c 等厚白云石环边胶结物; d 放射状方解石胶结物; e 细晶白云石胶结物; f 块晶方解石胶结物。P_{2c}, 湖南郴县大排冲, D-P-D-12-2, 正交, ×4.8。
3. 叶状藻障积岩, 叶状藻以平卧生长为主并障积灰泥, 偶见斜交或垂直层面。P_{1m}, 安徽铜陵, Tdp6-3, 单偏光, ×5。
4. 结晶白云岩, 准同生期混合水白云化的产物, 阴极发光下极暗红色或几乎不发光。P_{2c}, 江西修水, Xq49-4, 单偏光, ×15。
5. 亮晶生屑灰岩, 颗粒组分及亮晶胶结物均选择性白云化, 白云石中细晶自形程度较好。P_{2c}, 江西修水, Xq49-4, 单偏光, ×15。
6. 生屑灰泥灰岩, 鞍状白云石 (a) 充填裂隙中, 白云石粗晶状, 晶面弯曲, 波状消光。P_{2c}, 江西修水, Xq45-3, 正交, ×15。



1. 中晶白云岩,原岩为海绵骨架岩。晶间溶孔(a)、晶模孔(b)及片状喉道(c)有树脂注入。P_{2c},湖南郴州大排冲,D-P-D-5,单偏光,×50。
2. 亮晶颗粒灰岩。等厚环边纤状方解石胶结物(a)及深埋藏粗亮晶方解石胶结物(b),呈溶蚀不整合接触。P_{2c},江西修水,Xq51-3,单偏光,×20。
3. 海绵-苔藓障积岩。造礁生物苔藓室内壁为等厚环边纤状方解石(a)胶结物,向虫室中央为等轴细粒淡水潜流带亮晶方解石(b),两者之间呈溶蚀不整合接触,反映早期大气淡水溶蚀事件。溶孔(c)为浅埋溶解作用的产物,淡水潜流带亮晶方解石(b)被溶蚀。P_{1m},浙江桐庐,TLP1-8,单偏光,×20。
4. 海绵障积岩。浅埋藏胶结物(a)由孔隙边缘向中央粒径变粗,阴极发光下具三个世代,各世代间呈溶蚀不整合接触,裂隙中充填的亮晶方解石(b)不发光。P_{1m},浙江桐庐,TLP2-2,单偏光,×20。
5. 亮晶生屑灰岩。棘屑颗粒(c)因深埋藏有机溶蚀作用形成港湾状边缘,粒间孔中充填的深埋藏亮晶方解石(a)也因深埋藏溶解而残存无几,形成的深埋溶孔(b)为沥青充填。P_{1m},安徽铜陵,TSP5-1,单偏光,×15。
6. 裂隙 I (a)及裂隙 II (b)。裂隙 I 中充填的亮晶方解石不发光,裂隙 II 中充填的亮晶方解石不发光,鞍状白云石发暗玫瑰红色。P_{2c},江西修水,Xq45-3,单偏光,×10。