

黔桂泥盆、石炭系白云岩的形成模式*

方少仙 侯方浩 董兆雄 朱晓惠**

(西南石油学院, 四川南充 637001)

黔桂地区泥盆、石炭系层状白云岩, 厚度大, 层位稳定, 主要分布于与陆相连的碳酸盐岩台地外缘及孤立碳酸盐岩台地上。研究认为, 白云岩的形成模式主要有5种, 即潮汐泵汲白云石化模式、正常海水白云石化模式、近地表混合(水)白云石化模式(可分为海水较高和海水较低二种模式)、埋藏成岩环境白云石化模式(又可分为压实排挤流和热(盐)水为主混合的二种模式)及构造热液白云石化模式。不同的白云石化模式具有各不相同的机理和特点。

关键词 白云石化作用 模式 连陆碳酸盐台地 孤立碳酸盐台地 台内洼地 储集性

第一作者简介 方少仙 65岁 教授 沉积地质学

1 概况

晚古生代研究区属于华南陆板块, 处于被动大陆边缘。泥盆纪初受地裂运动影响, 在早古生代基底断裂的基础上, 发生以NW向为主、NE向次之的裂陷与裂离, 逐渐形成一系列裂陷海槽与孤立水下

断隆陆块相间的古构造格局。随海侵扩大, 碳酸盐沉积作用逐渐发育, 到早泥盆世后期孤立陆块已转变为浅水孤立碳酸盐岩台地, 在陆缘则发育与陆相连的碳酸盐岩台地, 而裂陷海槽则演化为深水、较深水或浅水海槽。台地与海槽间由斜坡相连, 主要接受原地细粒碳酸盐及碳酸盐岩重力流沉积。这

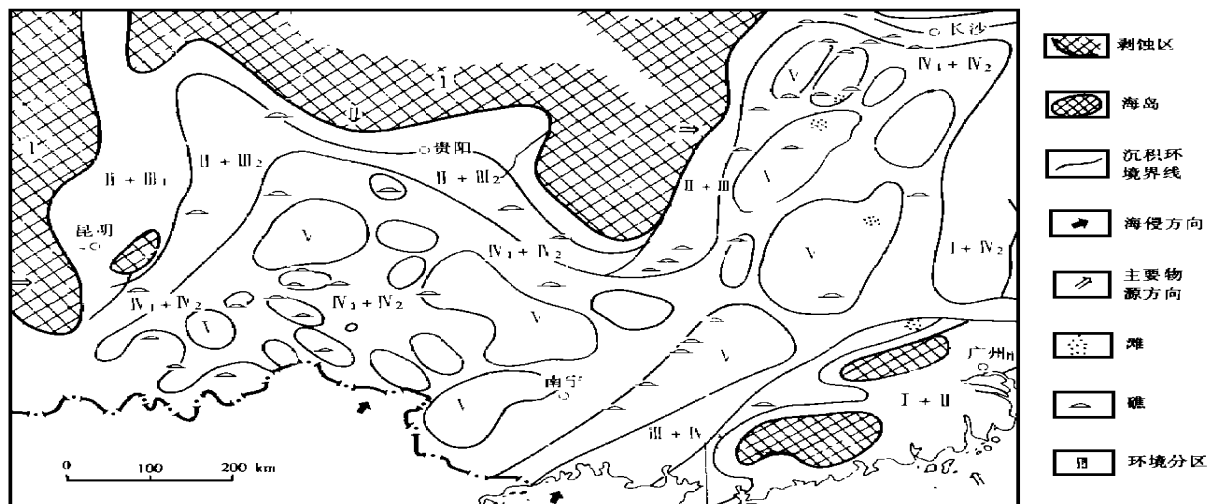


图1 黔桂地区早泥盆世末沉积环境图

Fig. 1 Sedimentary environment of Middle Devonian in Guizhou-Guangxi Region

I—陆区; II—过渡区; III—连陆碳酸盐台地; III₁—连陆内缘碳酸盐台地; III₂—连陆外缘碳酸盐台地;

IV₁—孤立碳酸盐台地边缘斜坡; IV₂—台间凹槽; V—孤立碳酸盐岩台地

* 中国石油天然气总公司“八五”重点攻关项目《中国油气储层研究》子课题(85-103-06-04)及《油气藏地质与开发工程国家重点实验室》资助项目。 ** 参加人尚有唐志敏, 李燕, 郑思贵

收稿日期: 1998 08 17

样便导致华南陆缘海域在早泥盆世末呈现出一幅两类碳酸盐岩台地与台间海槽相间排列、错落有序的独特地理景观(图1)。其继承性较强, 延续时间长, 在滇黔桂地区可延续至早三叠世^[1]。

泥盆、石炭纪研究区广泛发育白云岩,层位稳定,厚度数十米至数百米,呈层状,主要分布于连陆碳酸盐台地的外缘及邻近广海和深海槽的一些孤立碳酸盐台地上(图1),是研究区最有利的油气储层。因此研究白云岩(化)成因对了解区域储层的发育与分布规律至关重要^[2,3]。

2 白云石化作用

2.1 潮汐泵汲白云石化模式

该作用主要发生于潮坪准同生成岩环境。潮上带灰泥坪沉积物通常由微晶高镁方解石或文石组成,有时含少量介形虫、有孔虫、腕足、软体动物及藻类碎屑。发生准同生白云石化作用后主要转变为微晶白云石(岩),能较好地保留原始沉积物的结构特征如纹层构造(图版I-1)与生物屑假象。这类白云岩在两类碳酸盐台地的潮坪均有较广泛分布,但缺乏石膏或其他盐类矿物及其假晶,表明白云石化不是由强蒸发作用即蒸发泵作用引起,而与潮坪环境经受潮汐泵汲作用有关^[4]。

研究区地处低纬度湿热的热带与亚热带,海水可随风暴潮间歇性地进入潮上带灰泥坪,这种富镁海水在灰泥微粒孔隙中不断循环和向下泵汲、渗透,最终引发白云石化。孔隙水中镁离子的耗损依靠每次风暴潮的回灌得到补给。潮上带下部海水的补给也能增加富镁孔隙水,加强潮上沉积物白云石化(图2)。

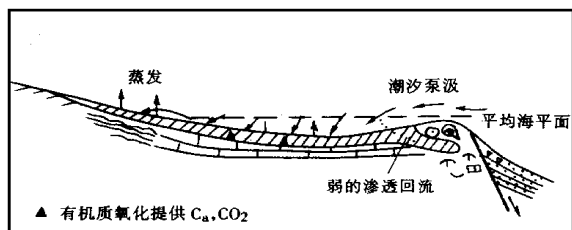


图2 潮汐泵汲白云石化模式

Fig. 2 Dolomitization model of tidal pumping

由于这类白云岩经受了后期埋藏成岩作用和表生成岩作用的叠加和改造,已重结晶为5~40 μm的微亮晶至细粉晶白云岩(图版I-1)。稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为-0.028‰~+0.35‰, $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围为-0.111‰~-0.666‰, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.708 080~0.708 453,均值为0.708 195,较偏高。

2.2 正常海水白云石化模式

正常海水白云石化作用也可称为海水泵汲白云石化作用,是由 Saller^[5]研究太平洋 Enewetak 等环礁

时提出的新见解。在海底同生成岩环境下,当海水与沉积物内部孔隙水发生温度或盐度差异时,冷的海水进入沉积物中,当处于碳酸钙的补偿深度时,海水对方解石不饱和而对白云石则是过饱和的,这样的海水可使碳酸盐沉积物发生白云石化(图3)。

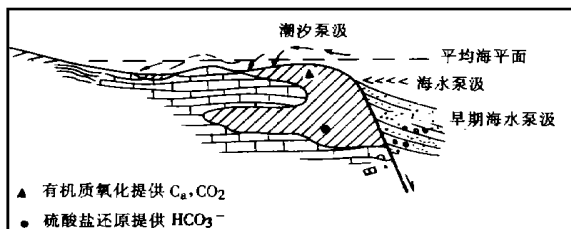


图3 正常海水白云石化模式

Fig. 3 Dolomitization model of normal seawater

研究区孤立或连陆碳酸盐台地的边界均被陡峻的深断裂控制,致使海水得以通过台地边缘上部狭窄的斜坡沉积物带,或直接向台地沉积物内部泵汲并不断提供丰富的镁离子使之发生白云石化。当台缘因同生断裂活动使台地发生等效海浸时,沉积物转而处于较深水环境,其下部已白云石化的沉积物虽被埋藏,但因台缘周边与海水相通,其上覆沉积物只要又处于碳酸钙补偿深度,海水泵汲依然使其发生白云石化,最终导致形成一定厚度的层状白云岩。

在海底同生成岩环境,沉积物中那些敏感性强的灰泥、部分生物屑及细颗粒优先发生白云石化,主要形成粉晶或微细晶结构;那些敏感性差的生物屑、颗粒则不完全或不被白云石化,故常形成交代不彻底的(灰质)白云岩。这类成因的白云石化沉积物经受后期埋藏白云石化及重结晶作用的改造,可以转变为结构较粗的交代完善的厚层白云岩,如广西上思县万参1井中、上泥盆统和下石炭统下部粉-中晶白云岩(厚526 m),原为斜坡钙屑浊流沉积物,其白云石化就是在渐进埋藏成岩环境下连续受到海水泵汲作用,以及后期成岩作用改造而形成的(图版I-2)。

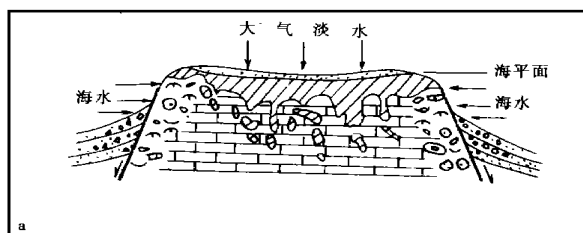
这类白云岩的稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为0.064‰~0.159‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为-0.660‰~+0.337‰,主要分布于-0.555‰~+0.337‰之间, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分布范围为0.708 263~0.708 812。

2.3 近地表混合(水)白云石化模式

2.3.1 海平面较高时的混合白云石化模式

广西田林县浪平孤立碳酸盐台地下石炭统大塘阶生物屑砂屑浅滩中发生的混合白云石化即为此例,是在海平面较高,但略低于台地边缘沉积物

时形成的。该白云岩段上部原为含生物屑砂屑泥粒-颗粒岩与颗粒岩、砂屑生物屑颗粒岩,淡水溶蚀孔隙发育,并见悬垂和新月型胶结,表明浅滩沉积物沉积后曾一度短暂暴露,受到大气淡水成岩作用的改造,在其下部形成了混合水带并引起白云石化,形成厚34.17 m的白云岩段。白云岩顶面平整、延伸远、层位稳定。上部白云石化强,向下减弱呈悬垂式渗漏状,再向下仅呈漏滴状分布(图4-a)。弱白云石化部位,白云石主要为自形、半自形的细晶结构,含量达15%~30%;强白云石化部位,白云石呈镶嵌粒状结构的斑块分布。稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-0.893‰,明显偏负, $\delta^{13}\text{C}$ 值为-0.600‰,具有混合水的特征。包裹体均一温度较低,为70~80℃或更低,均为液态包体,个别有机包体小于6 μm ,无色、



淡灰色、淡褐色,近长方形、菱形或不规则形。这类白云岩层位稳定可以追踪。广西桂林大圩上泥盆统的层状白云岩段也是这类混合白云石化作用的产物。

2.3.2 海平面较低时的混合白云石化模式

这类白云岩的空间分布与海平面较高时混合白云石化作用模式恰好相反,上部呈漏滴状,向下依次呈渗漏透镜体状及厚层状(图4-b)。这是因为海平面较低,台地内部淡水透镜体发育,随着淡水向下伏沉积物中渗漏,引起上部沉积物中亚稳定高镁方解石等组分发生镁离子出溶,或者因镁离子不足,或者因沉积物结构组分的不均一,发生不均匀的白云石化作用,导致形成漏滴状以至渗漏透镜状白云岩,只有下面的混合水带方能形成层状白云岩。这类白云

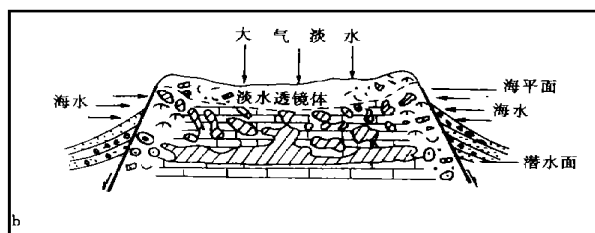


图4 混合白云石化模式

Fig. 4 Mixed dolomitization model

a—海平面较高时的模式; b—海平面较低时的模式

岩层位稳定,延伸远,底面平整或较平整地与下伏灰岩接触,见于广西德保县路甲上石炭统。

2.4 埋藏成岩环境白云石化模式

埋藏成岩环境白云石化过程实质上是多种白云石化机制的复杂混合式叠置,总体上可概括为下列两种模式。

2.4.1 压实排挤流白云石化模式

Matte and Mountjoy^[6]根据米埃特礁周边发生白云石化的情况,认为引起白云石化的溶液是从周围地层压出的地层水进入礁体孔隙的。在埋藏成岩环境中,灰泥、泥质、硅质以及细粒碳酸盐沉积物受压实的强度大,压实排挤出的含 Mg^{2+} 流体向遭受压实作用较弱的侧向和上方运移,并引起碳酸钙沉积物白云石化。在压实排挤流白云石化过程中,常常有其他来源镁离子的加入使溶液中的镁离子浓度增加,或有其他引发白云石化的机制参与作用,促使白云石化作用的完成与完善。根据研究区这类成因白云岩的岩石学及地化特征,可细分为下列2种模式。

2.4.1.1 调整 压实排挤流模式

这类白云石化镁的来源为:(1)沉积物孔隙中封存的富含 Mg^{2+} 的海水;(2)在浅埋藏成岩环境,粘土矿物转化时有一定数量的 Mg^{2+} 离子析出加入到孔隙水中;(3)碳酸钙沉积物中的高镁方解石质以及文石质生物骨壳、颗粒、灰泥发生矿物转化时伴生的 Mg^{2+} 的出溶。正是上述多种来源的富镁孔隙水在压实作用下被排挤进入碳酸钙沉积物后,引起强烈的白云石化。鉴于上述镁离子来源的混合成因,将其命名为调整-压实排挤流白云石化作用。

浅埋藏成岩环境,最高温度可达80℃左右,有机质处于未成熟-半成熟阶段,镜质组分或沥青反射率 R_o 为0.4%~0.5%。白云石化作用及其伴随的重结晶作用常使细碎屑碳酸钙沉积物转变为粗粉晶和细晶镶嵌结构为主的糖粒状白云岩(图版1-2)。那些敏感性较强的生物骨壳将优先被交代,按生物骨壳的显微结构不同,交代白云石可呈细晶、中晶等粒状镶嵌结构,常常显现出清楚的生物幻影或假象(图版-3,4)。至于那些敏感性较差的生物及其他组分则不易被白云石交代,因此在浅埋藏成岩环境

中交代成因白云岩内常保留有残余的生物或颗粒结构或原岩斑块。

2.4.1.2 有机质参与的压实排挤流模式

在晚成岩作用阶段的早期,对应为中埋藏成岩环境,正处于有机质未成熟向成熟的演化阶段,有机酸丰度剧增,除引起溶蚀作用外,由于有机质已开始发生裂解脱羟作用,形成小分子量的烃类、 H_2S 、 H_2O 和 CO_2 等物质并进入沉积物富镁孔隙水中, Surdam^[7]曾指出,一些烃可以在80~120℃温度范围内的流体相中存在。上述原因不仅使孔隙水中 CO_2 的含量增加,而且还在一定范围内促使碱的储备量增加,导致镁盐饱和于溶液之中并沉淀下来。所以有机质在压实排挤流白云石化过程中是起着重要作用的(图5)。

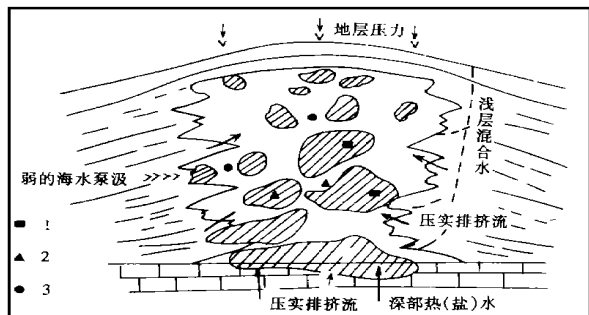


图5 生物礁中有机质参与的压实排挤流白云石化模式

Fig. 5 compaction-squeeze flow dolomitization model participated by organic matter in reef

1—矿物成分调整提供 Mg^{2+} ; 2—有机质氧化提供 Ca 、 CO_2 ;

3—硫酸盐还原提供 HCO_3^-

在中埋藏成岩环境中,由于温、压和埋深均较浅埋藏成岩环境增加,孔隙流体的流动较慢,在孔隙中停留的时间较长,因而白云石的交代、次生加大和重结晶作用均较充分,从而导致形成细-中晶、中晶或不等晶镶嵌结构的糖粒状白云岩,颗粒的幻影构造和假象仍较常见(图版I-5)。白云石晶体以及某些白云石晶体的环带和雾心白云石晶体的亮边中伴生的有机液体和液体包体的存在,表明在白云石形成过程中烃类正在形成和发生运移,从而被包裹于白云石晶体中。液体包体5~10 μm,长方形、菱形,少数为凸形,多为无色,少数为灰色;均一温度较高,变化范围为90~110℃。气液包体的大量存在再次证明这一阶段白云石化作用与有机质演化及烃类运移有密切联系,所以称其为有机质参与的压实排挤流白云石化作用。白云岩中稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为0.097‰~0.183‰,个别为+0.484‰~

-0.734‰。细、中晶白云岩平均有序度为0.8103, Mg/Ca 摩尔比值为0.7806。

当渐进埋藏作用达到中深埋藏成岩环境后,白云石化作用的特征表现在两个方面:一方面是对敏感性差的组分和未被交代的残余沉积物组分继续完善和完成白云石化;另一方面,在浅、中埋藏成岩环境中已白云石化的组分则发生进一步重结晶或次生加大。此期白云岩具粗晶、中-(巨)粗晶自形-半自形镶嵌结构,雾心亮边及环带结构(图版-5,6)。由于有机质仍处于成熟阶段的晚期,烃类主要仍为液态,液体包体均一温度较中埋藏环境高,已达117~140℃,包体为无色,长形,5~25 μm。稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为-0.186‰~+0.592‰,离散度大, $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围-0.948‰~-0.800‰,离散度小,白云石平均有序度为0.7838, Mg^{2+}/Ca 摩尔比值为0.929。

2.4.2 热(盐)水为主的混合(水)白云石化模式

进入深埋藏成岩环境后,沉积物已处于晚成岩作用的晚期阶段,残余孔隙水已数量不多,压实排挤流作用已不明显或不占主要地位,因此发生白云石化的首要问题是要有新的富镁流体的补充。研究区碳酸盐台地边界均受深断裂控制,借助这些断裂通道,处于深部的富镁热水及后来的热盐水先后向上运移进入沉积物或已白云石化的弱固结沉积物中,有时可能还有浅部地层淡水沿此通道下渗,它们与原有残余孔隙水形成一种新的混合流体,成为富镁溶液补给的新途径,使溶液的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 活度比大大增加,从而为新的白云石化提供了物质来源。这一白云石化作用可称之为埋藏热(盐)水为主的混合(水)白云石化作用(图6)。

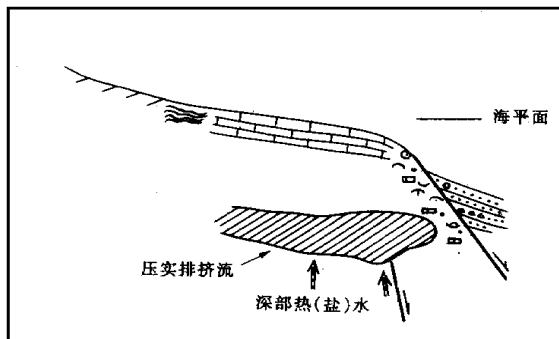


图6 埋藏热(盐)水为主的混合白云石化模式

Fig. 6 Mixed dolomitization model of buried hot brine

根据液体包裹体均一温度测量资料,白云石的形成温度为140~256℃,表明部分温度已达到晚成岩阶段的最高界限甚至有所超出。此时沉积物已遭

受多种成岩作用的改造与叠加,白云石生长空间多受限制,通过镜下观察得知,新白云石主要是在较大晶间孔隙、晶间溶扩孔隙、不规则溶孔洞、裂缝、溶缝中以环边状充填胶结物产出,晶体视孔、缝的大小和宽度而呈细晶、粗晶或巨粗晶自形生长,孔、缝中心晶体自形程度尤其良好,有时还发育良好的次生加大边缘或环带构造(图版I-7),晶面弯曲的畸形白云石亦时有所见(图版I-8)。深埋环境白云石中液体、气体、沥青包裹体三相共存。液体、气体包体10~30 μm , 显无色、灰色、微褐色,呈长形、浑圆形、不规则形;沥青包体5~15 μm , 不规则形,在紫外光下显极弱暗蓝色或不发光。在包体温度170~256 $^{\circ}\text{C}$ 的白云石晶体中,还普遍有石盐子晶,测得的盐度均大于26‰。这类白云石的稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-0.165‰~-0.470‰; $\delta^{18}\text{O}$ 值为-1.023‰~-1.130‰,离散度小,数值明显偏负。

2.5 构造热液白云石化模式

黔桂地区晚古生代由基底断裂控制形成了连陆碳酸盐台地、孤立碳酸盐台地与台间海槽相间排列的古地理景观。两类台地边缘深断裂带也是构造热液(深部热液和区域构造热液)活跃带(图7)。野外见台缘斜坡钙屑浊积岩层系中层状白云岩沿地层走向呈巨大的“脉状”产出,厚几十米至上百米,延伸几百米至若干公里。层状白云岩的中心部位呈白色中-粗晶结构,原始石灰岩组构已不可辨,向两侧白云石化逐渐减弱,白云岩晶粒过渡为细晶、粉晶级,岩石颜色逐渐转变为灰白、灰色,厚石灰岩组构逐渐可辨,直至过渡为无白云石化的石灰岩。典型实例见于广西隆林县隆或石炭系斜坡相顶部剖面中,见有30余米这类白云岩。

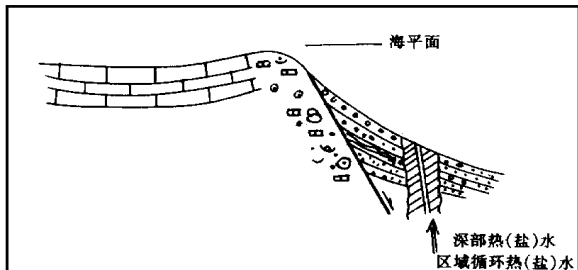


图7 构造热液白云石化模式

Fig. 7 Hydrothermalism of dolomitization model

研究中引用了西南石油学院碳酸盐岩研究室“中国南方泥盆、石炭纪岩相古地理及含油气性研究”的部分成果。此外,广西地质研究所吴诒教授

级高工,广西石油勘探指挥部张可怀,张合₄监高工等无论是野外和室内综合分析都给予了大力协助,特表谢意。

参 考 文 献

- 1 侯方浩,方少仙,陈景山,等. 西南地区上古生界海相碳酸盐岩沉积模式及其在油气勘探中的应用. 成都: 成都科技大学出版社, 1991. 1~20
- 2 方少仙,侯方浩,董兆雄. 广西贵州地区泥盆系、石炭系层状白云岩的特征与分布,“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室研究年报(1993~1994). 成都: 四川科学技术出版社, 1994. 98~110
- 3 方少仙,孔金祥,侯方浩. 中华人民共和国石油天然气行业标准(SI/T-5478-92): 碳酸盐岩成岩阶段划分规范. 北京: 石油工业出版社, 1993. 1~14
- 4 Carballo J D, Card Lynton S, Miser Donald E. Holocene dolomitization of supratidal sediments by active tidal pumping, Sugarloaf Key, Florida. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57(2): 153~165
- 5 Saller A H. Petrologic and geochemical constraints on the origin of subsurface dolomite, Enewetak Atoll: An example of dolomitization by normal seawater. *Geology*, 1984, 12(4): 217~220
- 6 Matte B W, Mountjoy E W. Burial dolomitization of the Upper Devonian Mietti buildup, Jasper National Park, Alberta. In: Zenger D H, Durham J B, Elhington R L. eds Concepts and models of dolomitization. *SEPM Mineral, Spec Publ*, 28, 1980. 259~297
- 7 Surdam R C, Crossey E S, Heasler H P. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis. *AAPG Bull*, 1989, 73(1): 1~19

图版I 说明

- 1 藻纹层白云岩。富藻层为微晶白云岩,晶径<0.02 mm,含泥质;富屑层为细粉晶白云岩,晶径0.04 mm。广西靖西县果阿, D_1 , 单偏光, $\times 30$ 。
- 2 粗粉晶白云岩。半自形,自形,晶间孔隙均被沥青充填。广西上思县万参1井1967.25 m, D_{1+2} , 单偏光, $\times 32$ 。
- 3 棘屑白云岩。棘屑粒径由粉砂级至中砂级,含量65%左右,均已白云石化,具保存较好的假象;灰泥基质已转变为粉晶白云石。广西横县六景, D_1 , 单偏光, $\times 30$ 。
- 4 粗-中晶白云岩。原岩为微晶生物屑灰岩,棘屑仅局部被白云石交代、切割;其它生物屑均已被白云石交代,但隐约可见幻影构造。广西大新县屏山, D_1 , 单偏光, $\times 30$ 。
- 5 中-粗晶白云岩。次生加大作用使白云石呈自形菱面体,具环带构造,晶体内部砂屑,有孔虫等原始颗粒的幻影十分清楚,晶间孔隙发育,局部有方解石充填。广西横县六景, D_2 , 单偏光, $\times 50$ 。
- 6 雾心亮边构造白云岩。细晶白云石雾心小,亮边宽;粗晶的内部暗色部分系白云石化的棘屑,次生加大亮边窄且发育成自形。贵州赫章县狗飞寨, 单偏光, $\times 30$ 。
- 7 细晶白云岩裂隙中充填的白云石。白云石具环带构造,残余孔隙中有亮晶方解石充填。广西贵县覃塘, C_1 , 单偏光, $\times 30$ 。
- 8 充填于白云岩裂隙中的畸形白云石。晶面弯曲,具透明的次生加大边。外侧粗大晶体为方解石。贵州贵阳市乌当, D_3 , 单偏光, $\times 8$ 。

(下转第45页)