

備

438825

P. A. 肖 勒 著

# “深水”石灰岩的沉积作用 成岩作用及油气潜力

美国石油地质学家协会进修丛书

(七)

石油工业出版社



美国石油地质学家协会进修丛书(七)

# “深水”石灰岩的沉积作用 成岩作用及油气潜力

P.A.肖勒著

陈景山译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书主要介绍各种较深水沉积物（包括深海石灰岩、碳酸盐浊积岩、碳酸盐滩缘岩屑堆以及共生沉积）的沉积型式和成岩型式。

Peter A. Scholle

### Deposition, Diagenesis, and Hydrocarbon potential of "Deeper-water" Limestones

Continuing Education Course Note, series 7

AAPG Department of Education

(Third printing, 1979)

•  
美国石油地质学家协会进修丛书（七）

“深水”石灰岩的沉积作用

成岩作用及油气潜力

P. A. 肖勒 著

陈景山 译

•  
石油工业出版社出版

（北京安定门外外馆东后街甲三十六号）

妙峰山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

•  
787×1092毫米 1/16开本 1<sup>1</sup>/<sub>2</sub>印张 30千字 印1—3,200

1982年3月北京第1版 1982年3月北京第1次印刷

书号：15037·2351 定价：0.25元

# 目 录

摘 要.....	1
引 言.....	1
深海石灰岩.....	2
沉积作用.....	2
成岩作用.....	4
浊积岩.....	6
沉积作用.....	6
成岩作用.....	7
滩缘岩屑堆积.....	7
沉积作用.....	7
成岩作用.....	9
共生的沉积物.....	10
油气开采和预测模式.....	11
结 论.....	12
参考文献.....	15

**摘要** 现已证实,美国、墨西哥、中东以及北海的深水碳酸盐沉积物中产有大量的石油和(或)天然气。这些储集层属于两种主要类型:深海沉积和经过搬运、再沉积的浅水物质。

深海石灰岩(主要是白垩)分布广泛,它构成过去1亿年中全世界所沉积的碳酸盐沉积物的70%左右。由于深海石灰岩含有原始的低镁方解石成分,沉积环境为深水,以及具有低的渗透率,因此,它特别不容易受到淡水的蚀变(这种淡水蚀变作用通常影响浅水碳酸盐岩)。更确切地说,在这种碳酸盐沉积物中,埋藏深度是关键因素,因为上覆层的压力产生机械的和化学(溶移)的压实作用,导致孔隙度降低。物理的和化学的证据表明,深海碳酸盐岩只有通过早期产生的超压作用、石油的早期注入或者未被埋藏,才能保持高的原生孔隙度,这可以北海的白垩为例,那里的白垩是高产油层。较晚的成岩破裂作用可以产生较小的(但还是重要的)储集潜力,例如在得克萨斯的奥斯丁白垩中。

经过搬运的浅水碳酸盐岩具有复杂的沉积型式与成岩型式,这些型式往往类似于台地碳酸盐岩的沉积与成岩型式。这些异地石灰岩在邻近台地边缘的地方呈扇形体出现,在海沟或深海平原中呈层状浊积岩复合体出现。不稳定的组分使这些沉积物易受淋滤作用、胶结作用和白云化作用。象在未经搬运的浅水石灰岩中一样,孔隙度的保存、降低或产生的方式是复杂的,也是难以预测的。然而,大量的油气可以出现在这种环境中(例如墨西哥的塔马布拉油田)。当勘探工作从陆架转向陆坡和陆隆地区时,这种储集层将越来越常见和越来越重要。

## 引 言

由于陆上的油气田越来越难发现,所以,近几年有一种趋势,即向“边缘地区”勘探。在这些边缘地区中,主要是在近海地区勘探,当技术发展时,海上石油普查可以逐渐向较深水的地方推进。现已在水深大于850米的地方打了一些探井,已在水深300米处开采油气(Rintoul, 1976)。而且,挑战者号考察船的钻探活动同海底完井技术的最新发展相结合,实际上最终有可能在任何水深的地方开展勘探。

同时,最近原油价格的上涨,也使得人们在以前对于商业开采来说只具有边缘潜在产量的地区进行勘探。在某些地区,在较深水的、较细粒的、渗透率较低的沉积物中经常获得鼓舞人心的成果,这就激发了人们的兴趣。的确,自1970年以来,仅在北海的深水碳酸盐相中就发现了25亿桶以上的石油和8万亿立方英尺的天然气。在美国,已从得克萨斯州的奥斯丁群(白垩系)和加利福尼亚州的蒙特雷组(中新统)深海碳酸盐与硅质沉积物中获得了大量的产量。

现代海洋学,特别是深海钻探计划(DSDP),使深海沉积作用、成岩作用和构造作用方面的知识大量增加,与此相应,对这种沉积单元的经济兴趣也与日俱增。因此,我们现在有可用的基本数据来限定可能的沉积变量,其中包括深水碳酸盐岩中具有经济价值的油层的形成作用。正如所有的这种研究一样,下面的参数是重要的:

- 1.原生沉积相,包括原始的粒度、孔隙度、矿物成分以及沉积单元的区域展布。
- 2.成岩史,它描述成分与孔隙度在沉积后期的变化。
- 3.油气的潜在来源,包括这类物质的热成熟作用。
- 4.圈闭机理。
- 5.定时,它是上述各种因素在时间上的相互作用。

本文打算概述各种较深水的沉积物（包括深海石灰岩、碳酸盐浊积岩、碳酸盐滩缘岩屑堆以及共生沉积）的沉积型式和成岩型式。重要的是弄清楚不同单元类型之间的区别，特别是要强调深海或半深海单元与经过改造的或异地的单元之间的差异。

## 深海石灰岩

### 沉积作用

深海碳酸盐沉积物是本文的重点。这种沉积包括软泥、白垩和灰泥，它们主要由各种超微化石类（特别是颗石藻）的骸骨和浮游有孔虫与次要的底栖有孔虫的介壳所组成。大化石，例如翼足类、瓣鳃类和较老沉积单元中的菊石类普遍存在，但很少是组成岩石的一个主要要素。哈肯森等（Håkansson等，1974）、汉考克（Hancock，1976）以及肖勒（Scholle，1977）广泛地总结了白垩和有关沉积物的沉积史。

由于颗石藻和有孔虫的沉积物都是由低镁方解石组成的，所以，较深水的碳酸盐岩具有独特的动物成分与地球化学成分，由此可得出几点主要推论。第一，这些沉积物只有在组分生物繁盛时才能形成。浮游有孔虫和颗石藻显然都是在侏罗纪时期进化的（Black，1971）。因此，前侏罗纪的深水相很少含有大量的碳酸盐沉积物，除非这种石灰岩是异地的。另一方面，在后侏罗纪时期，深海碳酸盐沉积物的重要性非常明显地增大，因此，在最近的1亿年中，它组成全世界碳酸钙沉积的67%左右（Hay等，1976）。深海碳酸盐沉积物数量的这种明显增多主要是在晚白垩世和第三纪时期完成的，这就使得深海沉积物的数量相对于古生代或中生代早期来说相应地大大增加了。

深海碳酸盐沉积物独特成分的第二点推论是，它不依赖于特定的有限来源区。更确切地说，凡是有组分生物存在的地方都可以形成这种沉积物。特别是颗石藻，它所能容忍的环境范围很宽，从热带水域到北方水域，从正常海到盐度极低的海都有分布。的确，甚至在象黑海（盐度为17ppt）和亚速海（盐度为11ppt）这样的地区中也已发现了现代白垩（Bukry，1974）。

深海碳酸盐沉积物堆积的水深范围从小于100米到大于4500米。这种堆积作用的限制因素是，碳酸盐组分与非碳酸盐组分的相对沉积速度以及碳酸盐组分被移走（或者是由于机械侵蚀，或者是由于化学溶解）的可能速度。在大多数的浅水区中，陆源碎屑物质的沉积速度相当高，趋向于超过深海碳酸盐的输入量。大多数白垩或白垩软泥的堆积速度为1~30米/百万年（Fischer，1969），尽管已在白垩纪陆架中记录到白垩的堆积速度高达54米/百万年（Hancock，1976）。因此，深海碳酸盐沉积物一般出现在水较深的地区，或者在沉积物“陷阱”如岸外盆地（例如加利福尼亚的大陆边陲）或海沟隔开了陆源碎屑主要源区的地方。甚至在具有这种屏障的地方，深海碳酸盐沉积物也往往含有大量的风吹来的或半深海的粘土级到粉砂级陆源沉积物。

除陆源碎屑物质外，其它沉积物也可能影响深海碳酸盐沉积物的堆积。在许多地方，例如加利福尼亚湾或者北极和南极地区，硅质浮游生物（硅质鞭毛虫、硅藻和放射虫）的

繁殖率远远超过钙质超微浮游生物和微体浮游生物的繁殖率。在这些地区，现正在堆积硅质沉积物。在前白垩纪时期，当时深海碳酸盐沉积物很少或没有，硅质沉积物在深水相中可能起更大的作用。

在深水区中，碳酸钙的溶解作用影响深海碳酸盐沉积物的净堆积速度。大约在1000和3000米之间的深度(文石补偿深度)上，文石组分如翼足类和底栖有孔虫一般被消除掉，而在方解石补偿深度(CCD)上，通常为4000~5000米，方解石组分往往从沉积物中完全溶解掉(例如，Berger, 1972; Roth和Berger, 1975; Bossellini和Winterer, 1975)。这些碳酸盐物质的消除是非常复杂的，并且随着当地的水化学、总沉积速度、水深、生物繁殖率及其它因素而变。此外，最近的研究工作表明，在文石质和方解石质生物群内，不同生物群有一种择优溶解顺序(Berger, 1970; McIntyre和McIntyre, 1971; Adelseck等, 1973; Wise, 1973)。甚至对大多数生物群中的种来说也可见到这种效应。

在深水相中，由于碳酸盐组分逐渐被溶解掉，所以，剩余的沉积物主要由硅质骸骨、红色半深海粘土以及风吹来的粉砂堆积物所组成。这种沉积已在深海钻探计划的岩芯中以及阿尔卑斯和亚平宁的中生代深水环境中描述过了(Garrison, 1974; Jenkyns, 1974; Bernoulli和Jenkyns, 1974; Bossellini和Winterer, 1975)。

白垩和有关沉积的深海成因具有进一步的含义。这种单元的展布一般很广，有非常一致的物理和化学性质。在异常高海面时期，白垩覆盖几十万平方公里的陆架和内陆地区。在晚白垩世，当时海面大概比现在高500米左右(Hays和Pitman, 1973)，白垩覆盖了美国西内陆和湾岸的大部分地区以及欧洲30%左右的地区。

欧洲和北美洲的白垩一般是极细粒的，有些具有多众数的粒度分布，最大值约为大于62.5和0.6微米(Hakansson等, 1974)。这些白垩由30%到90%以上的颗石藻和有孔虫碎屑组成，还含有谢姑儿(Inoceramids)、其它双壳类、棘皮类、钙球、腕足类和其它大化石所提供的一些成分。陆源碎屑组分主要是粘土和粉砂，含量从小于1%到大于50%。在原来混有硅质生物的地方产出二氧化硅，或者呈浸染状的方英石小球，或者呈孤立的燧石结核和燧石层。

基本上缺乏大型沉积构造。例外情况主要出现在过渡到生物丘相或砂屑石灰岩相的近滨区或浅滩区中。在这样的地区中偶尔有大水道和滑塌构造存在(Kennedy和Juignet, 1974)。克莱因(Klein, 1975)和库克等(Cook等, 1976)曾报道过深海钻探计划的岩芯中也有深海碳酸盐沉积物的滑塌与滑动构造。然而，在正常情况下，白垩剖面却很少出现过这类构造，而是逐渐向邻近的页岩、砂屑石灰岩或海绿石砂岩相过渡。汉考克(1975)很好地总结了这些过渡关系。

在较大程度上一般都出现较小型的沉积构造。在大多数的岸上露头中，最显著的沉积构造是韵律层理，其特征是富粘土沉积物与贫粘土沉积物的互层，或者是燧石结核带。在英国和北美洲的大多数白垩剖面内，互层中的单层厚度从10厘米到1米左右。利用平均沉积速度计算，这个厚度值说明旋回的时间间隔为20000~100000年。阿瑟和罗根森(Arthur和Roggenthen, 1976)曾报道，意大利南部的深水石灰岩中也有类似的数值；阿瑟和费希尔(1977)假设旋回反映碳酸盐输入量的周期性变化。

在旋回层内，较小型的沉积构造如水平纹理很好地保存在没有或很少有潜穴生物的地方。这种毫米级纹理往往含有保存完好的粪球粒(Hattin, 1975)，其最好实例出现在尼奥布拉拉石灰岩的斯莫基希尔段中。在其它地区，如英格兰，白垩基本上被生物的广泛潜穴

活动所均化 (Kennedy, 1970)。原生沉积构造的保存大概取决于底部水的氧化程度。因此,在不同的盆地内可以出现各种保存程度的沉积构造。

## 成岩作用

白垩的成岩作用原理与型式已在最近的许多文章中描述过了,例如纽格鲍尔 (Neugebauer, 1973、1974), 怀斯 (Wise, 1973), 马特 (Matter, 1974), 施兰格和道格拉斯 (Schlanger和Douglas, 1974), 肖勒 (1974、1977), 汉考克和肖勒 (1975), 肯尼迪和加里森 (Kennedy和Garrison, 1975), 汉考克 (1976), 这里仅简要地总结一下。在大多数实例中,海底上的早期成岩反应对白垩的孔隙度并没有很大的影响。个别生物或生物群可能被选择性地消除掉,有时个别层可能深深地被高镁方解石或其它碳酸盐矿物的沉淀作用所胶结(硬地),但是仅在极少数的情况下,这种胶结作用才影响大部分白垩剖面。

同样地,白垩暴露到陆上受风化,对强大的粒间压力没有影响,对孔隙度—渗透率的总关系也只有较小的影响 (Scholle, 1977)。当然,出露地表可能受到溶解作用和岩溶地面形成作用的影响(正如英格兰的白垩一样)。另一方面,在降雨量与蒸发量比值较低的地区中,可能形成钙结层(例如在得克萨斯或中东地区)。然而,除了这些非常接近地表的带之外,整个白垩剖面很少发生变化。甚至在处于渗流与潜流淡水中已有几千万年的白垩内,蚀变影响也很小。造成这种情况的原因在于:组成颗石藻和有孔虫的低镁方解石具有原始稳定性,而且水主要是通过岩石裂隙运动,而不是通过基质孔隙流动 (Edmunds等, 1973; Foster, 1975)。最后,由于大多数的较深水碳酸盐沉积物在其成岩史的较晚期之前没有淡水注入,因此这种影响一般只起较小的作用。在所有的这些方面,较深水的深海石灰岩基本上不同于含有大量不稳定文石和高镁方解石组分的浅水石灰岩。

白垩的最大成岩变化发生于埋藏时期,决定成岩变化程度的最重要因素似乎是最大埋藏深度,尽管许多其它因素也起重要作用。在英格兰和北海 (Scholle, 1974、1977)、大西洋和太平洋 (Schlanger和Douglas, 1974)、美国湾岸 (Cloud, 1975; Scholle, 1977) 和西内陆地区 (未刊资料) 的研究工作表明,一个剖面的最大埋藏深度与其平均孔隙度之间有非常一致的关系(孔隙度—渗透率的关系详见Scholle 1977年的文章)。当然必须记住,就许多地区来说,由于抬升和侵蚀,所以现在的埋藏深度大大小于最大埋藏深度。

埋藏深度在深海石灰岩中为什么如此重要的原因是清楚的。由于低镁方解石在近地表环境中固有的化学稳定性,所以早期成岩胶结作用被推迟了。因此,在较深的地下,除机械压实作用外,颗粒接触处或沿缝合面的压溶作用也成为降低孔隙度的主要机理。有一些作者,包括纽格鲍尔 (1973、1974)、施兰格等 (1973)、马特 (1974)、汉考克和肖勒 (1975)、明兰 (Mimran, 1975) 以及肖勒 (1977), 曾讨论过白垩中溶解缝、缝合线和颗粒接触处的溶解效应。

在埋藏的早期阶段,在形成稳定的胶结颗粒格架之前,沉积物内水的排出和机械压实作用是非常重要的。的确,早期的脱水作用解释了沉积物埋藏几百米深时孔隙度从原生的70~80%降低到40~50%。在较晚的阶段,不稳定颗粒中的碳酸钙被选择性溶解,特别是在差异应力大的地方(主要是颗粒接触处),它们通过液体薄膜被扩散作用或流动作用传到差异应力较小的地方(开放的孔隙或裂隙),并在那里重新沉淀下来。因此,白垩和有关沉积的胶结作用可以在没有外部物质输入的情况下完成。部分沉积物被破坏,为剖面的其余



部分提供胶结物，这一过程是上覆层数量的正函数，因此也是潜在差异应力的大小的正函数。

然而，最大埋藏深度和孔隙度之间的关系既不简单也不完全，因为可能有许多变化因素在起作用。这些因素至少可以部分地归纳如下：

1. 原生成分的影响各个层有不同的粒度、粘土含量或动物成分，这些因素可以影响那些层的胶结速度。施兰格和道格拉斯（1974）把这类影响因素称为一个层的“成岩潜力（diagenetic potential）”，并把这种变化与深海碳酸盐沉积物的声波地层学联系起来。当然，成分的其它变化，例如文石或高镁方解石的大量存在，对“正常”白垩的孔隙度将有更大的影响。

2. 孔隙水化学的影响已从理论（Neugebauer, 1973、1974、1975）和实践（Scholle, 1974、1977）这两方面证明，孔隙流体的成分对孔隙度随埋藏的降低率有较大的影响。如上所述，只有淡水存在而没有很大的上覆层压力，对白垩孔隙度的影响很小。然而，如果在埋藏时期孔隙中有淡水（或其它贫镁的液体）存在，溶解一再沉淀的速度就大大加快，孔隙度也很快降低。

3. 孔隙流体压力的影响由于白垩内孔隙度降低的主要机理是压实作用（机械的或化学的），所以，任何使内部差异应力降低的因素都将阻碍孔隙度的降低。异常高的孔隙流体压力就有这样的效应，有人（Harper和Shaw, 1974；Scholle, 1977）已指出，埋深超过3000~4000米的白垩能够保存很高的原生孔隙度。

4. 构造应力虽然在白垩内产生压实作用的差异应力往往是由上覆层压力的增大而产生的，但它们也可以由构造力所产生。因此，在断裂作用或挠曲作用强烈的地区中，白垩孔隙度的降低速度可能加快。这种现象已在英格兰（Mimran, 1975）和美国（未刊资料）的一些地区记录到了。然而，同时存在未胶结的裂缝却往往能使白垩的渗透率提高几个数量级（Foster, 1975）。因此，某些构造变形作用对于采油或采气来说可能是完全合乎需要的。的确，在湾岸和北海地区，油气的大量开采与裂缝的存在有关。

5. 烃类的存在沉积物（碳酸盐或陆源碎屑沉积物）孔隙内烃类的存在可以大大地降低成岩反应速度。这大概主要是通过隔水作用完成的，特别是当沉积物被石油所完全饱和时。例如，在饱和石油的地方，象文石这样的不稳定矿物已在沉积物内保存了3亿多年。这种现象对于北海储油层保存高的原生孔隙度来说可能是有意义的。

虽然上述的这些因素似乎是影响白垩成岩作用的主要因素，但其它变量（例如温度）可能也起重要作用。

正如已从理论和实践这两方面所指出的，在孔隙压力正常、构造应力不大以及存在海相孔隙流体的“正常”条件下，白垩经过2000~3000米左右的深埋藏，最终将具有小于10%的基质孔隙度。如果构造应力很大和(或)孔隙中有贫镁水存在，当上覆层只有1000~1500米厚时，孔隙度就能降低到10%。相反，当孔隙流体压力（流体静压力）保持在大致等于岩层静压力时，到很深的地方，白垩依然能保持高的孔隙度。这些关系的细节可见肖勒（1977）的文章。

# 浊 积 岩

## 沉 积 作 用

与上面所讨论的深海碳酸盐沉积物不同，钙质浊积岩是经过搬运和再沉积的。因此，它们的成分和沉积相型式主要受物源区和地形的控制。在这方面，通常是把碳酸盐浊积岩分为两种：陆架来源的和陆坡、陆隆、洋脊或海山来源。陆架来源的碳酸盐浊积岩由浅水生物的骨屑组成，往往以文石和高镁方解石为主，并混有可能为藻成因的文石泥。这种沉积物由于与滩缘岩屑堆积紧密共生，所以将在这一节讨论。

第二种浊积岩来源于陆架外的沉积物，因此一般缺乏不稳定的碳酸盐组分。在许多实例中，这种浊积岩的成分与深海石灰岩实际上没有差别。这种沉积一般来源于海山或大洋中脊的翼部，但也可能来自陆坡和陆隆，这发生在陆架沉积物由于在陆架上被捕获或者被分异搬运而未进入陆坡和陆隆的地方。安德尔和科马 (Andel和Komar, 1969) 曾描述过这种浊积岩的现代实例，许多作者，其中包括比尔和费希尔 (Beall和Fischer, 1969)、尤因等 (Ewing等, 1969)、韦勒 (Weiler, 1970)、肖勒 (1971a)、赫西 (Hesse, 1975)、克莱因 (1975)、罗伯逊 (Robertson, 1976)、库克等 (1976) 以及库克和泰勒 (在排印中) 曾描述过古代的这种浊积岩。

一般来说，这些浊积岩的成分与时代分布类似于物源区的深海沉积物。因此，它们一般都富含颗石藻和有孔虫，也可能含有少量的翼足类、钙球、海绵骨针、放射虫以及较粗的骸骨组分 (尤其是蛇尾类的棘皮板)。所以，大部分动物是由低镁方解石组成的，往往含有大量分布的蛋白石。虽然这些浊积岩在成分上类似于物源区的深海碳酸盐沉积物，但是粒度分选作用 (横向上和垂向上) 可能分离不同的动物成分。此外，浊积岩所涉及到的长距离搬运也可能使陆源碎屑或火山碎屑沉积物混入浊积岩中 (例如 Klein, 1975)。

在另一些情况下，细粒钙质浊积岩与插入的深海或半深海“背景”沉积物成互层，产生富碳酸盐层和贫碳酸盐层的有规律的岩性变化，这可能象非浊积成因的深海沉积物的岩性变化。因此，区别这两种沉积必须小心谨慎。

其它常见的沉积构造有：水平纹理、卷曲纹理、波痕、槽铸型与沟铸型以及遗迹化石，偶尔可见水道。在这些盆地的碳酸盐浊积岩中，可以出现标准的ABCDE沉积构造序列 (常常称为鲍马序列)，但是，由于坡度平缓和处于远端的沉积位置，所以碳酸盐浊积岩一般缺失A段和B段，而以C段或D段开始 (Scholle, 1971a; Robertson, 1976)。

这种碳酸盐浊积岩的层厚变化很大，多数为几厘米到1米左右 (Scholle, 1971a; Hesse, 1975; Robertson, 1976)，但有的层可超过25米 (Scholle, 1971a)。沉积物堆积这样厚和古流向一般多变的原因可能是浊积岩在封闭盆地内的积聚作用，安德尔和科马 (1969) 最先提到这一点。在这个假说中，浊流流入一个封闭盆地，由于不能流出，因而迫使浊流所携带的全部悬浮沉积物都沉积在一个比较有限的地区内。在这一过程中，浊流围绕盆地转向，产生复杂的水流型式。

深水碳酸盐油积岩的沉积速度可以大大地超过典型深海沉积物的沉积速度。它基本上又是积聚作用的函数。细粒油积岩的沉积作用仅出现在深海平原、海沟平原或其它盆地的坡度非常平缓的中心地区。因此，周围的广阔物源区可能把物质供给比较小的沉积盆地。例如，在亚平宁山脉北部的蒙特安托拉复理石中，曾确定了碳酸盐油积岩的沉积速度大约为120米/百万年 (Scholle, 1971a)。

### 成 岩 作 用

可以预测，由改造过的深海碳酸盐软泥所组成的油积岩，其成岩型式与大多数原地白垩的成岩型式相似。然而，同样也有一些因素造成重要的差异。首先，由于这些油积岩的组分是从原来的深水沉积物改造到更深的盆地中，所以最后的沉积位置将处于非常深的水中，往往在方解石补偿深度附近或以下。这就使得油积岩的顶面发生一些溶解。但是，这种作用受到某些因素的限制。这些因素包括非碳酸盐物质的保护性盖层的形成，这种盖层或者由半深海“背景”沉积物沉积而成，或者由沉积物—水界面处碳酸盐溶解作用产生的滞后沉积所组成。另一个因素是饱和 $\text{CaCO}_3$ 的孔隙流体从压实着的下伏沉积物中的排出，从而可以阻止未饱和的海水渗入沉积物内。这些因素与高的沉积速度相配合，可以使这种油积岩的海底溶解作用和胶结作用保持在最低程度上。

因此，这些油积岩在埋藏之前通常只具有最低程度的早期成岩胶结作用或溶解作用。沉积位置处于非常深的水中，一般可以保证油积岩在埋藏时期排除孔隙淡水，这个因素与快速的连续沉积覆盖相结合，使机械压实作用成为很重要的作用。在原地沉积的白垩内，广泛的机械压实作用（导致压碎和破碎颗粒）只出现在盖层沉积速度非常快或者有构造应力作用的地方 (Scholle, 1977)。然而，在白垩油积岩中，机械压实作用一般是进行化石破碎、颗粒溶蚀与变形以及方解石的强烈双晶化 (Scholle, 1971b)。

化学压实效应（包括缝合线的形成和颗粒接触处的溶解）在这些油积岩中也是重要的，但经常被机械压实效应弄模糊。再者，必须强调指出，这些细粒的深海碳酸盐油积岩尽管与原地白垩相似，但它们的变化型式却基本上不同于浅水石灰岩的成岩型式。

在富含原始蛋白石的这些沉积物内，氧化硅成岩作用也可能是重要的。这将在论述“共生沉积物”的一节中加以扼要讨论。

## 滩 缘 岩 屑 堆 积

### 沉 积 作 用

滩缘岩屑堆积这个题目是一个很大的题目，不可能在这样的一篇文章中进行充分论述。然而，这种沉积单元无论从学术观点还是从经济观点来看，都是非常重要的。有不少优秀的文章论述这个题目，其中有：鲁斯纳克和内斯特罗夫 (Rusnak和Nesteroff, 1964)，迈施纳 (Meischner, 1964)，加里森和费希尔 (1969)，汤姆森和托马森 (Thomson和Thomasson, 1969)，威尔逊 (Wilson, 1969、1974)，戴维斯 (Davies, 1968)，库克等 (19

72),蒙乔伊等(Mountjoy等,1972),伊诺斯(Enos,1974,1977),穆尔等(Moore等,1976)。

滩缘岩屑堆积显然会有各种各样的成分和沉积型式,这主要依赖于物源区的情况。它们可以包括滑塌沉积、滑动沉积、泥石流沉积、浊流沉积以及雾状混浊水团(nepheloid clouds)沉积。然而,它们有一个共同点,即沉积物均来源于陆架或上部陆坡。这种物质的成分在各个地质历史时期中是不同的,因为不同时期有不同的生物群生活在滩缘环境(例如Heckel,1974)。在大多数时期中,动物群象今天一样也是以分泌文石和高镁方解石的生物占优势。因此,这种改造过的沉积物具有不稳定的矿物,完全象与之相当的陆架沉积物一样容易受到成岩变化。

更明确地说,位于滩或环礁侧翼的盆地碳酸盐沉积物往往含有陆架成因的细粒与粗粒碳酸盐物质。细粒组分似乎是绿藻和其它骨骼生物破碎产生的原生文石泥。在古代实例中,由于存在广泛的成岩重结晶作用,所以难以确定这种泥的准确成因。但是,因为已论证过前侏罗纪时期没有深海成因的细粒碳酸钙,所以一般都假设古生代的所有盆地碳酸盐泥均来源于陆架。

碳酸盐碎屑相内的粗粒组分可以包括鲕粒、藻类、珊瑚、海绵、苔藓虫、层孔虫、厚壳蛤类、有柄类以及其它生活在滩缘的骨骼生物。由于它们的颗粒较大并具有特征性的内部与外部骸骨构造,因此,这类颗粒甚至在经过强烈的重结晶之后也往往能够鉴别出来。

滩缘沉积物的粒度分布基本上取决于它们所涉及到的沉积机理。在海底滑动或滑塌的情况下,单个岩块的大小可达几公里。在海底岩崩或泥石流内,大部分沉积物的粒级从泥级到巨砾级都有,据报道(Cook等,1972),有的含有大于 $25 \times 50$ 米的岩块。浊流主要搬运泥级至砂级的组分,有时含有粗砾。

这种沉积的内部沉积构造、层理序列以及空间形态也随沉积机理而变。一般说来,滩缘具有不同沉积过程所产生的相序,这些沉积过程是随着距离物源区的远近而变化的(Wilson,1975;Mountjoy等,1972)。在最靠近陆架或环礁边缘的带内,发现颗粒或岩块可能是由岩崩作用、滑动作用、滚动作用或滑塌作用从坡度陡到中等悬崖上搬来的。这种沉积单元的内部构造可能是乱七八糟的,实际上不存在递变或分选。

在离陆架边缘稍远些(几公里到几十公里)的地方,发现了海底块体流沉积,它们由角砾和大角砾组成(滑塌块集岩,Olistostromes)。这种沉积可以含很大的岩块,但碎屑通常被嵌在泥支撑的基质中。单层一般轮廓分明,具有突变的底面和平坦或不规则的顶面。泥石流沉积可能与深海沉积物或浊积岩成互层。

在离物源区更远的地方(一般为几公里到几百公里),主要是浊流沉积。这种沉积物往往是较细粒的,并含有大量的粘土级到砂级物质。这种浊积岩从底到顶呈正递变。近端区的单个沉积层可能比远端区的更粗、更厚,递变也更清楚。浊积岩(以及块体流沉积)沿陆架前缘可能不是均匀分布的,取而代之的可能是通过峡谷和水道汇集于盆地内。这常常产生一系列部分重叠的岩屑锥,其顶点位于海底峡谷口。

在离陆架碳酸盐源区再远一些的地方,或者在地形上隔开浊流沉积的地方,极细粒的碳酸盐可能堆积在通常所称的“非补偿盆地相”内。这种碳酸盐泥一般呈悬浮状态由正常洋流搬运,或者呈雾状混浊水团搬运。堆积速度一般很慢,并且具有薄而平的层理,这是一个共同的典型特征。沉积构造和颜色主要取决于盆地内循环和氧化的程度。水体静止不动产生深颜色,并使纹理得以保存。循环越强烈,颜色越深,潜穴越多,原生沉积构造保存越少。



因此，异地沉积物的连续变化序列可以比碳酸盐台地的更宽。这类物质的堆积速度和堆积数量可以是很大的，在礁前岩屑堆积的情况下，沉积速度往往超过陆架。这种沉积可以单独地成为重要的、有经济价值的目的层，但作为逼近陆架边缘碳酸盐岩隆的标志也是有意义的。

## 成岩作用

上面所描述的、来源于陆架边缘物质的各种沉积物，均具有很大的成岩潜力。但是，由于它们沉积在中深至很深的水中，所以这些沉积物往往免受早期淡水的侵入。因此，大量的成岩变化一直延迟到成岩作用晚期。就孔隙的保存和产生来说，这种因素可以产生一些重要的效应。首先，原生孔隙可能长期保留，使石油进入储集层。这可以导致不稳定组分、孔隙以及良好的储集性能长期保存。

其次，可能存在丰富的高镁方解石组成的骸骨颗粒，这就为成岩过程中生成白云石所需要的大量的镁提供一个内部物源。因此，在陆架来源的深水沉积物中经常可见次生白云岩。这一过程有时可能会提高渗透率。

第三，成岩早期保存不稳定颗粒，它意味着这些颗粒保持其成岩潜力，并且在成岩晚期容易受到淋滤。在这种位置可能形成一个由方解石或白云石胶结和（或）交代的格架，它将承受上覆层的应力并使次生孔隙保存下来。

对陆架来源的碳酸盐沉积物的海底溶解作用与胶结作用研究得比较少。文石补偿深度出现在比方解石补偿深度浅得多的水深处。因此可以预料，文石质沉积物，尤其是文石泥将发生一定程度的溶解（例如Milliman, 1975）。在某些地区，例如牙买加北部，甚至可能发生广泛溶解（Land, 口头交流, 1977）。但是，在大多数地区，异地沉积物的快速沉积和饱和 $\text{CaCO}_3$ 的孔隙流体的存在，则可能使溶解数量减少。海底的胶结表面（硬地）主要是在较长的无沉积时期（可能是几千年或更长）中形成的。因此，除了大多数已压缩的盆地沉积物剖面外，这种胶结作用对任何剖面都没有重大影响。然而，金斯伯格和詹姆斯（Ginsburg和James, 1973）的研究工作证明，在70~300米水深内的碎屑扇的近端部分，海底胶结作用可能十分重要。

正如对深海碳酸盐沉积物和非陆架来源的浊积岩所指出的那样，压实效应在尚未经过早期广泛胶结的沉积物的成岩过程中是重要的。因此，大多数改造到较深盆地内的浅水碳酸盐沉积物将显出颗粒的机械变形以及溶解效应，例如在早期成岩作用无效的地方所出现的缝合线和颗粒穿插现象。

与大多数深海石灰岩不同，经过再改造的陆架沉积物在直到埋藏后都没有淡水的地方表现出最强烈的化学压实。成岩响应的这种主要差异是由陆架沉积物和深海沉积物之间在矿物学上的原始差异所引起的。经过再改造的陆架沉积物含有化学上不稳定的颗粒，当它与淡水接触时，足以形成一个坚固的、抗压实的胶结格架。然而，只有在上覆层加厚时的成岩晚期，深海沉积物才与所输入的淡水起反应。

## 共生的沉积物

如果不考虑沉积关系，就不可能充分探讨深水沉积物。经常发现深水沉积物与陆源碎屑浊积砂层、海底扇复合体的颗粒流砂层、半深海的红色和黑色页岩或硅质沉积物成互层。总结所有这些沉积物类型已超出本文的范围，但是，对深海和半深海的这些沉积略加说明可能是有益的。

在硅质生物的繁殖率大大超过钙质浮游生物的地方（例如加利福尼亚湾或者南极洲周围地区），以及在钙质组分大量溶解的方解石补偿深度附近或以下的地方，现正在形成硅质沉积物。水深变化、海洋环流型式、海洋的碳酸盐化学以及其它因素可以形成硅质层与钙质层的大型和小型这两种互层层理。

由于硅质沉积经常出现在生物丰富和上涌强烈的地区（现代与古代），因此它们往往含有大量的有机质。在那些具有隔离盆地或其它局限盆地的地区中，丰富的有机质并不会完全被氧化掉，而且硅质沉积物势必呈细微的纹层状和黑颜色。这种沉积（例如加利福尼亚中新统蒙特雷页岩）可以成为良好的生油层。这些油气可以运移到共生的岩石中，或者在一定条件下也可以运移到能作为储集层的硅质岩中。

最近对氧化硅成岩作用的研究（例如，Calvert, 1971; Heath和Moberly, 1971; Wise等, 1972; Lancelot, 1973; Murata和Larson, 1975），证明了氧化硅的重结晶顺序是从蛋白石到方英石（约50°C）再到石英（约110°C）。粘土和碳酸钙的存在势必使这个顺序复杂化。粘土似乎阻碍石英的生成，而碳酸钙似乎加速石英的生成（Lancelot, 1973）。总之，这些氧化硅的转化势必与岩化作用和孔隙度的降低有关。

但是，当这种硅质沉积物岩化时，它变得更易碎。因此，甚至在受到轻微的变形时，在这种沉积物内都能产生强烈破裂作用，这种裂缝型储集层可以储集非常大量的石油。例如，蒙特雷页岩的储集层、圣玛丽亚盆地以及圣巴巴拉海峡中的圣伊尼兹层。

虽然硅质沉积物现在限于陆架—陆坡环境中的局部地区，但在古代则广泛得多。在中新世时期，氧化硅沉积（主要是硅藻的）出现在环太平洋边缘的许多盆地内。在始新世时期，一个主要的氧化硅沉积事件与大西洋内A层的形成有关。在侏罗纪，放射虫燧石曾沉积在主要的整个地槽带内，包括古地中海和加利福尼亚弗兰西斯科地体。然而，在古生代及更早的时期，硅质沉积物分布最广，那时尚无深海碳酸盐沉积物。的确，硅质沉积物的沉积环境可能与白垩纪时期白垩的沉积环境相同，也就是说，它们是深海沉积物，并且覆盖大多数未被陆源碎屑所快速充填的地区。例如，在奥陶、志留和泥盆纪，放射虫燧石（如阿肯色均密石英岩、卡巴洛斯燧石和马拉维拉斯燧石）曾广布浅海和深海地区。

与碳酸盐沉积物成互层的细粒陆源碎屑在许多相同方面是重要的。在底水停滞或氧气不足的条件下沉积的这种单元可以成为丰富的油气源。最近的研究证明，甚至整个大洋盆地都可能存在循环受限制的时期，使含氧最少的带扩大并堆积富含有机质的黑色页岩（Fisher和Arthur, 在出版中）。

对陆架和深海碳酸盐沉积物的碳同位素值的初步研究表明，这些循环事件可以在盆地边缘的沉积物内用同位素方法测出（Scholle和Arthur, 1976）。因此，可以预测任一个

时代的盆地沉积物的生油潜力。同时，有些工作者注意到这些事件的旋回性，这也使得预测模式能够建立起来（Fisher和Arthur，在出版中）。

## 油气开采和预测模式

了解深水碳酸盐沉积物的沉积型式与成岩型式对于预测油气远景区来说是有用的。近几年来，已在不少地区证实了它们的产油潜力。北海高产的白垩储集层位于3000米左右的深处，其高产原因是由于孔隙流体压力异常高以及可能由于含油饱和度阻碍胶结作用而使原生孔隙度保存下来的缘故。而破裂作用一般是提高总的渗透率。

在美国湾岸地区上白垩统白垩内发现的小型油气田主要赋存在300~2000米深处。在这一地区，尽管在埋藏浅的地方（圣马科斯穹窿或萨宾隆起）有与重要破裂相结合的淡水注入，但油气的产出仍可归因于原生孔隙度的部分保存。例如，在奥斯丁群内试油的一些井中，初产量平均约为每井每日300桶，然后迅速下降到30~50桶（例如Long，1976）。但是，有一些井连续地慢速开采了四十年之久。这说明大多数石油产于裂缝内，但也说明石油从岩石基质向裂缝体系的缓慢运移大大地增加了产量。

最近，已在加拿大东部的斯科舍陆架上的怀恩多特白垩内发现了经济价值不大的油气。含油白垩出现在N-50井和E-48井的1200~2000米深处；在其它4口井中也曾记录到重要的油气显示。这些白垩具有很高的孔隙度（达37%），很可能是由于保存海相孔隙流体和埋藏不深这样综合因素的结果。

这三个实例说明了可能的远景产量的主要类型。一个概括阐述白垩内最有利的勘探目的层的预测模式应该包括下列地区：

(1) 在白垩可能含有任一种孔隙流体并且埋藏不深（即0~2000米之间）的地方。

(2) 在保留有海相孔隙流体并且排斥淡水的地方。在这种地区，重要的基质孔隙度直到3000米深处都可以保持不变。

(3) 在异常高的孔隙流体压力降低有效压应力的地方。在这种条件下，埋藏深度不再是孔隙度降低的控制因素，而且多孔的白垩可以出现在0~4000米以下的深处。

其它产量可能来自基质孔隙度低但破裂作用强烈（如沿着尖锐挠曲或断层）的地区，或者来自岩性异常（例如生物丘、侵入的火山岩或砂屑石灰岩）的地区。

碳酸盐油积岩（或者是陆架来源，或者是陆坡来源的）的油气产量尽管没有普遍意义，但也是有远景的。许多碳酸盐油积岩的快速沉积和互层状细粒沉积物的存在，使超压力迅速产生，而这又可能阻止破坏孔隙。这种沉积单元与含有机碳的页岩或硅质沉积物的共生以及在局限盆地（大陆边陲，陆隆棱柱体，阻塞的洋脊盆地）内的巨厚沉积，也可能有助于烃类的热生成作用。

盆地边缘碳酸盐碎屑扇的油气产量要重要得多。最好的实例也许是墨西哥波扎里卡油田的塔马布拉石灰岩（Barnette和Illing，1956；Boyd，1963；Viniestra和Castillo-Tejero，1970）。这段石灰岩的采油量现已超过9亿桶（Boyd，1963）。在沉积时期，从滩到盆地的地形高差约为1000米，而且大多数的作者现在一致认为石油产自金路带的埃尔

阿布拉礁上搬来再沉积的转石层中(Viniegra和Castillo-Tejero, 1970; Enos, 1974, 在出版中)。这种角砾岩层通常是递变的,并夹有典型属于盆地相的、含燧石的暗色碳酸盐泥岩。

塔马布拉转石相内的平均有效孔隙度大约是14%,并且是由空洞、晶间孔隙和裂缝联合组成的(Barnette和Illing, 1956)。因此,文石质碎屑的淋滤作用、白云化作用以及构造破裂作用在储集层的形成中都起重要作用。相反,保存下来的原生孔隙度在这种储集层内并不重要。

将来很有希望发现类似的油气田。时代相当的礁从墨西哥延伸到得克萨斯和墨西哥湾周围到佛罗里达。这个礁带的礁前相由于埋藏很深,因而研究很差。同样,在美国东部大陆边缘上已发现了晚侏罗世到早白垩世的礁(Schlee等, 1976)。而且,这些礁埋藏很深(超过6000米),但这个礁带的礁前相内的油气远景还是很大的。

石油勘探取决于存在更多的孔隙性储集岩层。有利的捕集机理和生油层同样也是重要的。在这一方面,可以证明深水碳酸盐沉积物比与之相当的陆架沉积物产油能力要更高。未风化的许多深海石灰岩富含有机质并呈深色,这些石灰岩既可以作为生油层又可以作为储集层。其它深水石灰岩与富含有机质的页岩紧密共生。通过深海钻探计划岩芯的研究、碳同位素研究以及其它技术,有可能预测盆地范围内捕集异常大量有机质的时间间隔。例如,就北大西洋盆地来说,经过初步研究证明,在早白垩世阿普第到阿尔必和晚白垩世森诺曼晚期到土伦早期这两个时间段内大量地发育了富含有机质的黑色页岩,它们可以作为生油气岩层(Scholle和Arthur, 1976)。

于是,似乎有理由把有机碳产状和成熟作用的预测模式、碳酸盐岩成岩作用的模式以及已知的构造型式结合起来,得出一个全面的勘探方案。墨西哥、中东以及其它地区的许多最高产的油田,似乎反映盆地沉积物内异常捕集有机碳的时间段和滩缘碳酸盐岩复合体同时的或紧接着的形成作用之间的密切关系。这种密切关系使海上地区具有很大的油气远景。

## 结 论

1.深水碳酸盐岩已经是北海和墨西哥等地的油气的重要储集层。当勘探活动逐渐向更深的水域发展时,它们的重要性也将渐渐增加。

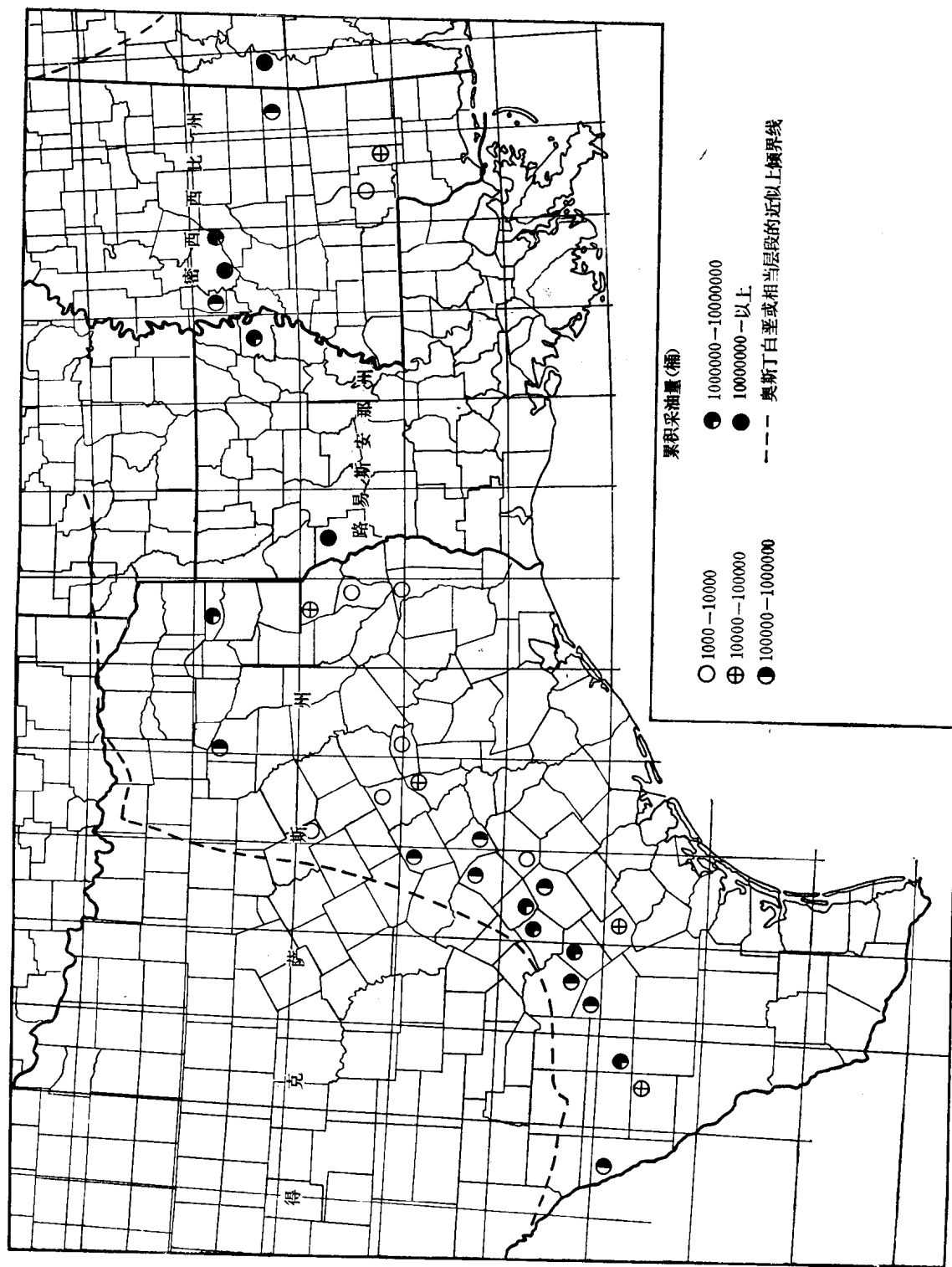
2.在许多较深水的石灰岩内,孔隙度降低的主要机理是与负载应力有关的机械压实作用和化学压实作用。因此,粒间应力降到最小程度(通过最浅的埋藏或最大的孔隙流体压力)对于保存储集性能(即孔隙度和渗透率)是重要的。在深海石灰岩内原始的稳定低镁方解石成分阻止广泛形成的次生孔隙。

3.在碳酸盐滩边缘的岩屑堆积中,成岩晚期的淋滤作用(在稳定的胶结格架建立之后)可以产生很好的次生孔隙。

4.盆地沉积物内有机质的分布似乎与主要洋盆中大规模的循环变化有关。陆架碳酸盐岩的碳同位素分析有可能用来预测盆地的有机碳含量。

5.把模式化的碳酸盐岩成岩作用和有机碳的分布结合起来,在预测深水石灰岩的油气潜力方面似乎是最有成效的。





附图 1