

# 苏南下三叠统青龙组碳酸盐岩的 成岩作用和孔隙演化

姜月华 岳文浙 业治铮 魏乃颐

(南京地质矿产研究所)

**提要** 苏南下三叠统青龙组碳酸盐岩中, 由于沉积相(台地浅滩相和深水斜坡—盆地相)的复杂性, 导致了成岩作用和成岩环境的多样性。作者通过薄片观察, 阴极发光和碳、氧同位素的分析以及孔隙度、渗透率的研究, 对该地区胶结作用、白云石化作用、溶解作用等九种成岩作用进行了详细的讨论, 并在此基础上建立了相应的成岩作用和孔隙演化的模式。

**关键词** 成岩作用 孔隙演化 下三叠统青龙组

**第一作者简介** 姜月华 男 27岁 硕士 沉积学

## 1 概况

苏南位于扬子地体的东部, 下三叠统青龙组在该区分布广泛, 其中尤以沿长江一线出露最佳, 前人曾对其地层、古生物、沉积相和古地理等作了较详细的研究, 但是, 对成岩作用却很少有讨论。青龙组沉积相的分布见图1。本文以南京东郊珠山(斜坡—盆地相)和漂

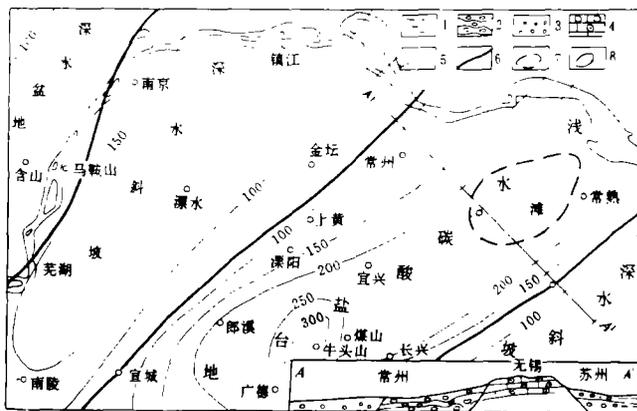


图1 苏南下三叠统青龙组(下段)沉积相图(据朱洪发等, 1986; 冯增昭等, 1988)

Fig.1 Sedimentary facies of the lower Triassic Qinglong Formation (Lower member) of southern Jiangsu province, China (Modified from Zhu Hongfa etc. 1986; Feng Zengzhao etc., 1988)

1.泥灰岩 2.瘤状灰岩 3.砾屑灰岩 4.颗粒灰岩 5.厚度等值线 6.沉积相界线 7.沉积亚相界线 8.滩

阳洋渚山(台地浅滩相)两剖面为代表,对青龙组发生的主要成岩事件以及孔隙演化等作一讨论。

## 2 成岩作用

青龙组碳酸盐岩的成岩作用主要有如下九种:

### 2.1 泥晶化作用

泥晶化作用或称泥晶结壳,是指颗粒表面被微生物(藻菌类)钻孔后向内生长过程中微晶(灰泥)胶结物充填或加积结壳而形成的一种泥晶包壳。现代这种作用仅限于热带及亚热带浅的或近地表的海水中。本区东南部青龙组颗粒灰岩中颗粒表面多具泥晶套(图版 I, 1),即是台地浅滩环境早期成岩阶段的产物。泥晶套的形成一方面可以阻止早期溶解作用的进行,另一方面也可以保护溶解后形成的铸模孔。

### 2.2 深水海底胶结作用

深水海底胶结作用见于斜坡—盆地地带,主要在无沉积期形成结核(瘤)或硬底,胶结物是微晶的镁方解石或文石,这在现代海底已经发现并进行了详细的研究。由于海底胶结作用相当缓慢,由其形成聚集粒至结核或进一步联接成层(硬底),往往需要数十万年,所以,了解更多的是前第四纪较老的沉积物:本区(以珠山剖面为例)即见较多的瘤状(结核状)灰岩,其形成明显与海底胶结作用有关,有时可以见到结核明显的围绕一个完整的菊石壳进行,形成包裹菊石的结核。一些硬底上见藻结壳和大量的生物钻孔。由于瘤状灰岩层的形成必须是沉积间歇期与沉积期的不断交替,才能形成一个层系。因此,在埋藏期压实、压溶作用下,沉积间歇期形成的瘤(或结核)构成稳定性单元,而沉积期末胶结或弱胶结的灰泥则构成响应性单元,故在瘤内多见缝合线,而灰泥内则见微缝合线群或粘土层。所以,现在所见的瘤状灰岩虽明显的受压溶改造,但仍可显示出韵律性。

### 2.3 浅水灰岩的胶结作用

浅水灰岩的胶结作用明显地见于颗粒灰岩的粒间孔和泥粒灰岩、粒泥灰岩生物屑体腔孔中。这对颗粒灰岩来说是一种重要的成岩作用,对其原生孔隙的演化和发展影响很大。现以洋渚山剖面青龙组颗粒灰岩为例,对其结构特征加以说明。根据镜下及电镜观察,颗粒灰岩的胶结作用可以分为三个世代:第一世代胶结物常为纤维状(图版 I, 1)或犬齿状、叶片状,沿颗粒边缘分布。纤维状胶结物形成于海水潜流或渗流带,如浅海潮下带及海滩岩;而犬齿状、叶片状胶结物则产于天水潜流带,亦可以见于潮间—潮下带。需要指出的是,本区一些颗粒灰岩尚见新月形胶结物(图版 I, 2),这种胶结物明亮而无泥晶化边缘,说明形成于天水渗滤带。第一世代胶结物可使原生孔隙度减少约5—10%。第二世代胶结物为近等粒状亮晶方解石,此种胶结物可以在多种成岩环境中产生。在海相环境形成于埋藏成岩阶段;在地表环境形成于沉积物初步石化以后,见于天水潜流带和混合水带。根据本区砂屑颗粒灰岩( $J_{sy}-\delta-35$ )、鲕粒颗粒灰岩( $J_{sy}-\delta-54$ )、残余鲕白云质颗粒灰岩( $J_{sy}-\delta-55-4$ )三个碳氧稳定同位素样的测试数据,投影到 B.W.Sellwood 等(1989)所提供的鲕粒颗粒灰岩单独颗粒与胶结物稳定同位素变化范围图式中,发现全部落入区 II,即早期埋藏环境混合水作用胶结物的区域(图 2),显然,这表明了该区台地浅滩(鲕滩或沙滩)大多数曾暴露或接近水面,而受到了天水的改造,同时,这也说明了胶结物和白云南石化为混合水成因。

第二世代胶结作用使原岩孔隙减少最大, 约 20—30%。第三世代胶结物为粗粒银嵌状亮晶胶结物, 呈自形晶, 且为贴面接触。其在埋藏阶段 (深藏) 孔隙水或区域地下水内沉淀, 充填于第一、第二世代胶结物充填后所剩余的粒间孔隙内, 与第一、二世代呈结构不整合 (图版 I—3)。这期胶结作用使孔隙减少约 5% 左右。经过胶结作用后, 颗粒灰岩的原生粒间孔隙基本消失殆尽, 仅少数颗粒灰岩可保持少量胶结残余的原生粒间孔隙, 并多被油浸染或沥青质充填。

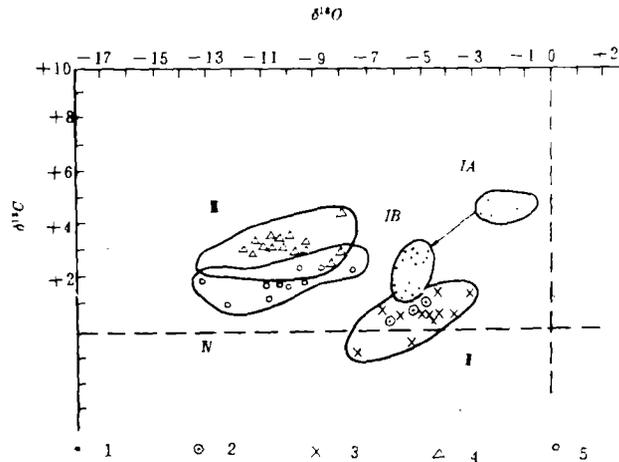


图 2 单独颗粒和胶结物碳氧稳定同位素变化范围图 (据 B.W.Sellwood 等., 1989)

Fig.2. Variation diagram of carbon and oxygen stable isotopes in single grain and cements

(After B.W.Sellwood et. al., 1989)

1. 鲕粒和微晶胶结物 2. 本区二个鲕粒颗粒灰岩和一个砂屑颗粒灰岩 3. 早期埋藏混合水方解石胶结物 4. 马鞍状白云石 5. 微含铁方解石胶结物 I. 在天水变更作用期间展示鲕粒从原始放射组构造退变到同心状无构造的倾向 II. 天水和海水混合环边胶结物 III. 深埋马鞍状胶结物 IV. 晚期微含铁方解石

### 2.4 白云石化作用

本区白云石化作用在不同层位、不同地点, 其成因机制完全不同。周冲村组 (中三叠统) 的白云岩与膏盐共生, 具微—细晶结构, 见大量结核状、雪花状、板状石膏或石膏假晶, 显然是高盐卤水渗透回流白云石化的产物, 与蒸发环境有关, 属于早期 (准同生) 成岩交代的产物; 洋渚山剖面青龙组中颗粒灰岩、泥粒灰岩和粒泥灰岩均普遍微云化, 顶部鲕粒灰岩已大部白云石化, 白云石呈自形或半自形菱面体散布于砂砾屑、鲕粒的溶孔及胶结物中, 或散布于粒泥灰岩、泥粒灰岩基质中, 这种白云石化是在地下浅含水层淡水与海水混合而形成的混合白云石化的产物; 深埋压溶白云石化现象广泛见于珠山及洋渚山剖面, 在灰泥灰岩、瘤状灰岩、蠕虫状灰岩以及粒泥或泥粒灰岩中广泛分布, 多呈极细晶或细晶菱面体散布于压溶作用形成的微缝合线群、粘土层及缝合线附近或集中分布于其中 (图版 I, 4)。白云石化溶液可受缝合线阻隔, 白云石仅分布于缝合线的下部, 说明富镁溶液与压溶作用的密切关系, 并明显的产生于压溶作用期间或稍后; 在珠山青龙组顶部可见有后生白云石化现象, 由这种石化形成的白云岩常受构造断层所控制, 白云岩与围岩呈侧向过渡或呈突变接触

关系,这种白云石化镁的来源可能为深部渗透重盐水。

上述白云石化都对发育晶间孔隙有利。

## 2.5 新生变形作用

新生变形作用在古代灰岩中普遍发生。由于其沉积或早期成岩环境的不同,其发生的时间亦不同。在台地浅滩区,由于淡水的注入,文石和高镁方解石在早期成岩阶段多已转变为低镁方解石;而在较深水的海底环境,由于海水镁离子的毒害,故其新生变形作用多发生于埋藏成岩阶段,由于温压的升高,文石和高镁方解石变得不稳定从而转变为稳定的低镁方解石。新生变形作用不仅表现为同质异象矿物的转化,而且还表现为晶体加积现象的重结晶,这种晶体的增大,就产生紧密的晶体骨架的填积和孔隙的大量减少。

## 2.6 压实、压溶作用

压实、压溶作用在洋渚山和珠山剖面均较发育。压实作用主要发生在埋藏较浅的部位,而压溶作用则在埋藏一定深度以后长期发育。在台地浅滩区,由于早期成岩作用强烈,形成稳定性单元多发育缝合线,而在斜坡—盆地地区,既可见稳定单元(如硬底、结核等),也发育响应单元,因此,除了缝合线外,还可见微缝合线群、层以及弥散型富粘土层并伴随着压溶白云石化。压实作用的表现通常是颗粒破裂、超紧密堆集(图版 I, 5),以及体积的缩小;而压溶作用则常表现为发育水平波状、锯齿状、尖峰状等各种缝合线,以及颗粒间的缝合接触,有时可“切割”溶蚀颗粒(图版 I, 5)。缝合线在蠕虫状灰岩(珠山剖面青龙组中上部)可平行层理密集出现。缝合线群和粘土层多见于瘤状炭岩的瘤体之间及粒泥灰岩中,而弥散型压溶白云石化多见于珠山剖面的灰泥灰岩中。除深埋阶段形成水平或近水平的缝合线外,在后生成岩期尚可见由构造应力造成的垂直和斜交层理的缝合线。

压实、压溶作用一般都是使岩石孔隙度大大降低,但伴随着压溶白云石化和稍后的溶解作用亦可增加孔隙度和渗透率。如见沿缝合线溶解增大后,有沥青质充填和铸体的进入。

## 2.7 黄铁矿化和硅化

青龙组中普遍见有黄铁矿化,特别是在斜坡和盆地相沉积物中,黄铁矿多呈立方体散布于岩石中。黄铁矿化主要发生在早期成岩和晚期深埋成岩阶段,与有机质分解造成的强还原环境有关。硅化作用在本区不甚发育,仅见于青龙组中下部,见燧石、粉晶石英充填孔隙和构造裂隙中。硅化作用主要形成于表生作用阶段。

## 2.8 溶解作用

溶解作用主要有三期:第一期溶解作用主要发生在本区东南部的台地浅滩沉积物中,天水渗流带或潜流带上部的早期溶解作用形成粒内溶孔(如鲕模孔、砂屑及鲕粒的粒内溶孔)(图版 I, 1)和粒间溶孔。特别是在洋渚山剖面青龙组中上部,粒内溶孔相当发育,但又多被后期亮晶方解石等充填。第二期溶解作用发生在埋藏成岩阶段,由有机质分解形成的酸性水所引起,形成粒间溶孔、晶间溶孔、溶洞及延缝合线和微裂隙形成溶缝,这期溶解缝隙为有效储集空间,多为油气及沥青质充填。第三期溶解作用发生于近代或古代剥蚀面上的表生阶段。天水的溶解作用形成溶孔、溶洞及岩溶沟、洞、缝系统,这便孔隙度大大增加。现代形成的溶孔、洞、缝系统对油气储集意义不大,而本区东南部,在中三叠统沉积以后上升遭受剥蚀,早白垩纪地层不整合覆盖于中、下三叠统地层之上,这次暴露、剥蚀、溶解所形成的古岩溶洞、缝、沟体系的储集性不可低估,对找油有特别意义。

## 2.9 后生阶段的构造裂隙

由构造应力所产生的构造裂隙,其特点是边缘平直,延伸远,具有一定方向和组系。多次构造应力作用产生的不同期次裂隙可以互相切割。本区构造缝大致可分填缝、半填半开缝和开缝三种。在铸体薄片开缝和半开缝见有铸体注入,而填缝因被方解石胶结充填而无铸体注入。构造裂隙及其它缝隙在形成以后,在其后的成岩过程中可被溶蚀增大,亦可被胶结充填而消失,这两种作用随着水价质 PH 值及离子浓度的变化可以多次交替进行。一些较早形成的裂隙,被方解石充填后,在单偏光显微镜下并不明显,仅显示一些亮晶方解石斑块,但在阴极射线照射下则非常明显并可显示出胶结充填物的世代(图版 I, 6)。一条裂隙被溶解加大后,有二期胶结物充填,第一期胶结物具环带状构造,显示橙黄色与不发光或暗橙色相间的环带,这反映晶体生长过程中介质水  $Mn^{2+}/Fe^{2+}$  比的变化,富锰发橙黄色,富铁则不发光,而中心部位的粗晶银嵌方解石则不发光为铁方解石。

构造缝与其它缝隙配合可以提高孔隙度,更重要的是提高渗透率。

### 3 成岩作用模式和孔隙演化

本区下三叠统青龙组成岩作用可以划分为早期成岩、埋藏成岩、后生和表生改造四个阶段。其中,在早其成岩阶段和埋藏成岩阶段中,台地浅滩相(洋渚山)和斜坡—盆地相(珠山)发生的成岩作用有明显的差异,前者早期成岩作用相当发育,而后者早期成岩作用较微弱,但深埋成岩作用却十分发育(图 3)。现将本区各阶段孔隙演化简述如下:早期成岩阶段,深水海底胶结作用常形成硬底,使原生孔隙大大降低,而在台地浅滩环境,则有二种情况,一种是海水渗流带及潜流带,纤维状文石和高镁方解石胶结物使颗粒灰岩原生孔隙降低 5—10%左右,另一种是淡水渗流带,则发生溶解作用,一些文石或高镁方解石颗粒首先被选择性溶解,产生大量粒内溶孔,此外,粒间孔也被溶解加大,这就增加了孔隙度。在淡水潜流带、混合水带以及海水潜流带,胶结作用常占主导地位,早期形成的各种粒内孔,粒间孔通常为第二世代的粒状方解石所充填,使大部分孔隙消失,孔隙度急剧下降,但这阶段的混合白云石化作用形成的极细晶—细晶白云岩,可发育较好的晶间孔,使孔隙有所增加。埋藏成岩阶段,压实、压溶作用及伴随的银嵌状第三世代胶结物,可使原生孔隙丧失殆尽,但此阶段酸性水的溶解、压溶白云石化、重结晶作用也均可增加孔隙度。后生阶段产生的构造裂隙及缝合线为油气运移提供了良好通道,但稍后的方解石充填又使其储集性降低。表生阶段,形成的次生溶孔、溶缝以及岩溶洞缝体系,均可极大地提高岩石的孔隙度,但只有油气运移前的表生改造作用形成的孔、洞、缝才有实际意义。

### 4 潜在储层的发育层位

本区下三叠统青龙组潜在储层的发育层位主要有二个:一个是东南部台地相颗粒灰岩,其原生孔隙相当发育,虽然在成岩演变过程中大多被胶结,但少量仍被保存,而且还发育了晶间溶孔、粒内溶孔、构造缝、压溶缝等,改善和提高了岩石的渗透性和孔隙度。此套颗粒灰岩累积厚度为 42.82—89.61m,孔隙度变化范围为 0.27—4.30(%),渗透率 0.01—0.51( $\times 10^{-3}\mu m^2$ ),是比较有利的储集岩层,加之本区在三叠纪末抬升,遭受剥蚀淋滤,在不整合面之下,发生的次生岩溶孔、洞、缝体系,实为有利的勘探地段。另一个是西部斜坡相

瘤状灰岩和砾屑灰岩，此套灰岩是宁镇一带青龙组主要组成部分，累积厚度达197m，句容盆地戴家边容2井获工业油流，证明该套地层有一定的储油空间。这套地层原生孔隙不发育，主要发育次生溶孔、缝合线和构造裂隙。在一些构造转折端或轴部发育裂隙带，再结合原有孔隙具一定的储集性。其孔隙度为1.32—1.98(%)，渗透率为0.41—0.53( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )，加之岩石中有机质丰富，区域盖层较好(巨厚石膏层)，因此，也是不可忽视的储层。

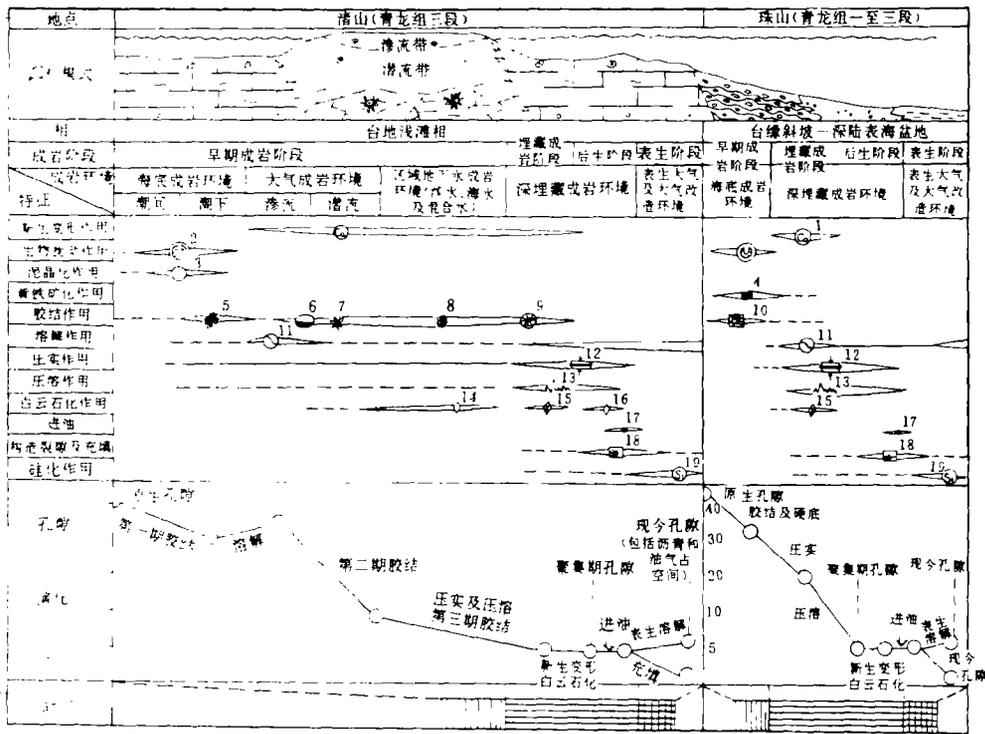


图3 宁常地区下三叠统碳酸盐成岩作用模式及孔隙演化特征

- 1. 新生变形作用; 2. 生物扰动作用; 3. 泥晶化作用; 4. 黄铁矿化作用; 5. 纤维状胶结物; 6. 新月型胶结物; 7. 大齿状或叶状胶结物; 8. 等轴粒状胶结物; 9. 壤岩粒状胶结物; 10. 较深水海底胶结作用及硬底; 11. 溶解作用; 12. 压实作用;
- 13. 压实作用; 14. 混合白云石化; 15. 压溶白云石化; 16. 后生白云石化; 17. 进油; 18. 构造裂隙; 19. 硅化作用;

收稿日期: 1991年1月11日

### 参 考 文 献

- (1) 宋洪发等, 1986, 苏南青龙群沉积相及储集性探讨, 岩相古地理文集(2), 北京: 地质出版社。
- (2) 冯增昭等, 1988, 下扬子地区中、下三叠统青龙群岩相古地理研究, 昆明: 云南科技出版社。
- (3) Sellwood B.W., ed., 1989, Sediment. Geol., 61, p233-237.
- (4) Steven G.D., 1983, Brigham Young University 《Geology studies》, v.30, part1, p.1-18.

## Diagenesis and Porosity Evolution of Carbonate Rocks in the Lower Triassic Qinglong Formation, Southern Jiangsu Province, China

Jiang Yuehua Yue Wenzhe Ye Zhizheng Wei Naiyi

(Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources)

### Abstract

Diagenesis in the lower Triassic Qinglong formation of Southern Jiangsu are very complex and can be divided into nine kinds: micritization, deep-water cementation in the sea floor, shallow-water cementation, dolomitization, compaction and pressolution, dissolution, neomorphism, pyritization and silicification, structural fissure. Among those, micritization often formed micrite envelope on grain surface in shallow-water areas, which can prevent early-stage dissolution and protect casting pores formed by the dissolution. Deep-water submarine cementation occurred in the slope-basin areas and generally formed nodules or hard ground during no sedimentation. Shallow-water cementation can be clearly distinguished into three periods: 1. Forming of fibrous, dog-toothed, or foliaceous cements, which reduced 5-10% of original pores; 2. Forming of equigranular cements decreased about 20-30% original pores; 3. The Forming of grain mosaic-like sparry cements, which were clearly uncomformable with the first and the second cements and reduced pores about 5%. Four kinds of the dolomitization are recognised: 1. Dolomites formed by penecontemporaneous dolomitization are usually intergrowthed with gypsum; 2. Mixed water dolomitization occurred in the shallow-water areas, its result are euhedral to hemieuhedral dolomite rhombsthat distribute in dissolved pores of intraclast ooid cements, or matrix of lime wackestone and packstone; 3. Dolomites caused by deeply buried pressolution occurred in microstylolitic groups and clay bands or nearby stylolites; 4. Epigenetic dolomitization controlled by the structure commonly distribute along faults and the contact of dolomite surface with wall rocks is transitional or abrupt. Compaction and pressolution ordinarily made rock porosity reduce greatly, but accompanying pressolved dolomitization and late dissolution, porosity and permeability could be increased. There are mainly three periods of dissolution in the areas discussed, the first occurred in platform shoal beach facies and created a lot of dissolved pores in the intergrains and intragrain; the second formed in buried diagenetic stages and were effective reservoir spaces for the most part and were frequently filled with oil, gas and asphalt; the third dissolution happened in supergene stages and was majorly on recent or ancient erosional surfaces. Crystal Overgrowth that caused by neomorphism generally reduce a great deal of pores. The silicification was formed in supergene stages and occurred universally, especially in the slope-basin facies. Besides the increasing of porosity, more importantly, structural fissures raised permeability.

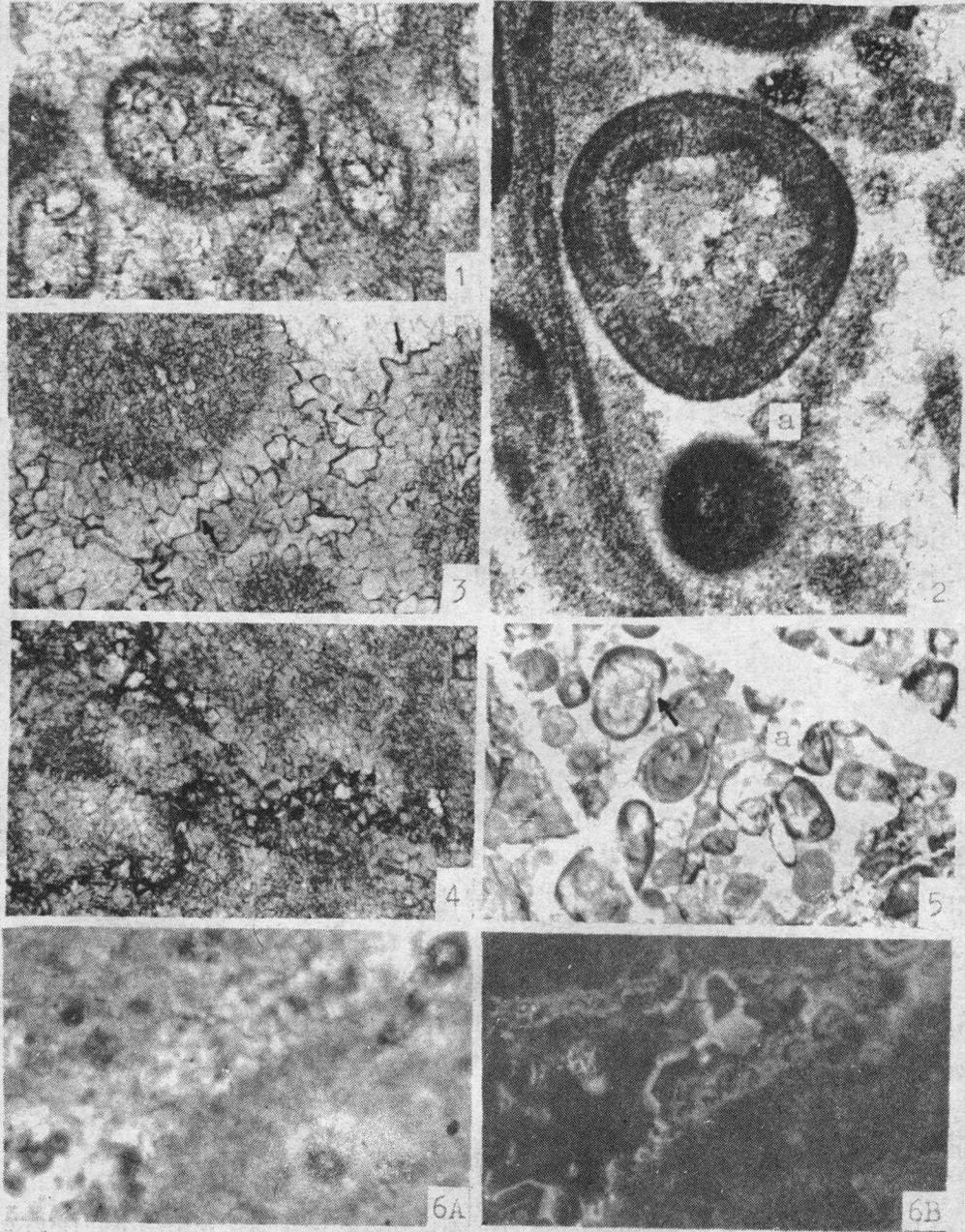
Studying results showed: original pores influenced by the diagenesis changed greatly, in the shallow-water areas rapid drop of original pores was principally influenced by the cementation, but in the deep-water slope and basin the decrease of pores was chiefly affected by the compaction and pressolution.

Besides, according to test data, two potential reservoir rocks in carbonate rocks of Qinglong formation are discovered: one is lime grainstone of shoal beach facies in southeast districts and its porosity is 0.27 to 4.30% and permeability is  $0.01$  to  $0.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; another is nodular limestone and calcirudites of slope-basin facies in the western district and its porosity is 1.31 to 1.98% and permeability  $0.41$  to  $0.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

#### 1 期

*continued from page 142*) if the rainfall was higher than 450mm,  $\text{CaCO}_3$  concretion contained loess and palaeosol would be formed.  $\text{CaCO}_3$  in loess layers exists mainly as the non-concretion form such as thin film and stain, and the  $\text{CaCO}_3$  in paleosols exists mainly in the form of concretion.  $\text{CaCO}_3$  content and existing form demonstrate that the loess was developed under arid climate and palaeosols under humid climate.

The illuvial depth of  $\text{CaCO}_3$  is a stable mark of the climate condition and nearly unaffected by the time of soil-forming, it can indicate palaeoclimate more reliable than  $\text{CaCO}_3$  content and is an important parameter to ascertain the maturation of soil and classify the soil types as well as prospect the residue. According to the illuvial depth of  $\text{CaCO}_3$ , the weathered layers of Early Pleistocene is thin and weakly argillic altered, which was resulted from arid climate rather than the shortage of leaching during the soil-forming process. The thickness and clayzation degree would not change greatly even if the weathering last longer, and those thin weathered layers are mature palaeosols. There are weathered loess layers with the thickness of 1–2 meters between the bottom of the first and fifth palaeosol and the illuvial layer of  $\text{CaCO}_3$ , they are discontinuous illuvial layers and indicates that the two palaeosols are leached acid soils that had become weathered crusts developed under the condition with the mean annual rainfall higher than 800mm.



1、浅水鲕粒颗粒灰岩, 鲕粒内部被溶蚀 (后又被充填) 而泥晶化边缘却保存。胶结物有纤维状环边方解石和等粒状方解石两个世代。单偏光,  $\times 200$ 。 2、鲕粒间的触点新月型胶结物 (a)。单偏光,  $\times 128$ 。 3、鲕粒颗粒灰岩中, 第一、第二世代方解石胶结物与第三世代方解石胶结物呈结构不整合关系 (箭头所示)。单偏光,  $\times 250$ 。 4、自形或半自形白云石菱面体集中散布于缝合线及其附近。单偏光,  $\times 128$ 。 5、压溶缝合线“切割”溶蚀鲕粒 (a) 和压实作用造成颗粒的破裂 (简明头所示)。单偏光,  $\times 32$ 。 6、早期形成的裂隙在单偏光下不明显, 但在阴极射线照射下非常明显, 并可见世代现象。6A, 单偏光, 6B, 阴极发光,  $\times 123$ 。