

# 碎屑岩储层碳酸盐胶结物成因研究进展

张青青<sup>1,2</sup>, 刘可禹<sup>1,2</sup>, 刘太勋<sup>1,2</sup>, 孙润平<sup>3</sup>, 孟阳<sup>4</sup>

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院; 2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室; 3 中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院; 4 中石化胜利油田分公司油气开发管理中心

**摘要** 在对国内外相关文献充分调研的基础上,对碎屑岩储层碳酸盐胶结物的基本特征、物质来源、成因机制进行系统梳理和论述,总结了不同机制下碳酸盐胶结物的分布规律,并强调了几个需要注意的问题。碳酸盐胶结物具有多类型、多期次和多种分布形式的特征,其物质来源可分为内源和外源2种类型。碳酸盐胶结物可以由砂泥岩协同成岩作用、蒸发作用、生物碎屑溶解再沉淀作用、沉积速率控制作用、热对流作用、深部热流体作用等机制形成。在陆相碎屑岩储层中,砂泥岩协同成岩作用是形成碳酸盐胶结的最重要机制,但在海陆过渡相—海相地层中,除了砂泥岩协同成岩作用外,生物碎屑溶解再沉淀作用、沉积速率控制作用也是重要的碳酸盐胶结物形成机制。不同成因机制下形成的碳酸盐胶结物的矿物类型及特征、控制因素和分布规律存在差异。碳酸盐胶结物成因分析应注意利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值判断物质来源的不确定性;应重视层序地层和沉积环境在海陆过渡相—海相地层对碳酸盐胶结的作用;应注意相同的矿物类型(如“铁白云石”)或相似分布特征(如“顶钙”)成因的多解性。

**关键词** 碳酸盐胶结; 物质来源; 成因机制; 分布规律; 碎屑岩储层

中图分类号:TE122.2 文献标识码:A

## 0 前言

碳酸盐胶结物是碎屑岩储层中最丰富的自生矿物之一<sup>[1]</sup>。前人的研究表明,碳酸盐胶结尤其是中晚期碳酸盐胶结多为破坏性成岩作用,能显著降低储层的孔隙度和渗透率,影响储层质量<sup>[2-4]</sup>和开发过程中的流体流动<sup>[5]</sup>,在宏观上侧向延伸广的连续分布的致密胶结层可引起储层垂向分隔,成为流体流动的屏障和油气的遮挡层<sup>[5-6]</sup>。碳酸盐矿物对温压、流体酸碱性等变化敏感,孔隙流体性质的变化极易影响其溶解-沉淀过程<sup>[7-8]</sup>。碳酸盐胶结物复杂的成因问题一直困扰地质学家<sup>[9-10]</sup>,目前尚未有学者对其进行系统梳理和论述;人们对海相地层中碳酸盐胶结的成因机制缺乏系统了解,对不同成因机制下碳酸盐胶结物的特征、分布规律及控制因素等也缺乏足够的认识。本文通过充分调研国内外相关文献,对碳酸盐胶结物的基本特征、物质来源和成因机制进行了系统梳理,总结

了不同成因机制下碳酸盐胶结物矿物类型及特征、控制因素和分布规律等,最后强调了在进行成因分析时需要注意的问题,以期深化对碎屑岩碳酸盐胶结成因理论的系统认识,并为实际工区的研究工作提供理论依据。

## 1 碳酸盐胶结基本特征

### 1.1 矿物特征及溶解-沉淀影响因素

碳酸盐胶结物矿物类型多样,主要包括方解石、白云石、铁方解石、铁白云石、菱铁矿、片钠铝石等,它们各自具有不同的产状,其中方解石多呈连晶状(图1a)或晶粒状(图1b),铁方解石多呈晶粒状(图1c),白云石和铁白云石多呈半自形—自形菱面体状(图1d)等,菱铁矿多呈晶粒状(图1e),而片钠铝石常呈放射状(图1f)、针柱状等。碳酸盐矿物的溶解-沉淀平衡受到温度、压力、孔隙水化学(离子活度、pH值、盐度、溶解的有机化合物)的影响<sup>[7-8, 11-12]</sup>。温度升高,碳酸盐矿物的溶解度明显降

收稿日期:2021-03-10; 改回日期:2021-06-02

本文受中国-东盟海上合作基金项目“东盟临海深水油气资源潜力研究”(编号:12120100500017001)、国家自然科学基金项目“基于重建三角洲储层构型的剩余油分布模拟实验研究”(编号:41772138)资助

**第一作者:**张青青,在读博士研究生,主要从事沉积学和储层地质学的研究工作,通信地址:266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号;E-mail:qqzhupe108@163.com

**通信作者:**刘可禹,教授,主要从事沉积量模拟及油气成藏等研究。通信地址:266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号;E-mail:liukeyu@upc.edu.cn

低;CO<sub>2</sub>分压降低或pH升高,均有利于碳酸盐矿物的沉淀。白云石和铁白云石的稳定关系取决于温度和Fe<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup>活度比,方解石、白云石和菱镁矿之间的平衡关系取决于温度和Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup>活度比<sup>[11]</sup>。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度增加有利于方解石、白云石沉淀<sup>[13]</sup>;溶液

(如氯化钠溶液)盐度升高,会促进碳酸盐矿物的溶解;而由于同离子效应,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度的升高,则不利于碳酸盐矿物的溶解<sup>[14]</sup>。CO<sub>2</sub>、乙酸和H<sub>2</sub>S等不同酸性流体溶蚀能力达到最强时的温度区间不同,分别对应于60~90℃、90℃附近和120~150℃<sup>[15]</sup>。

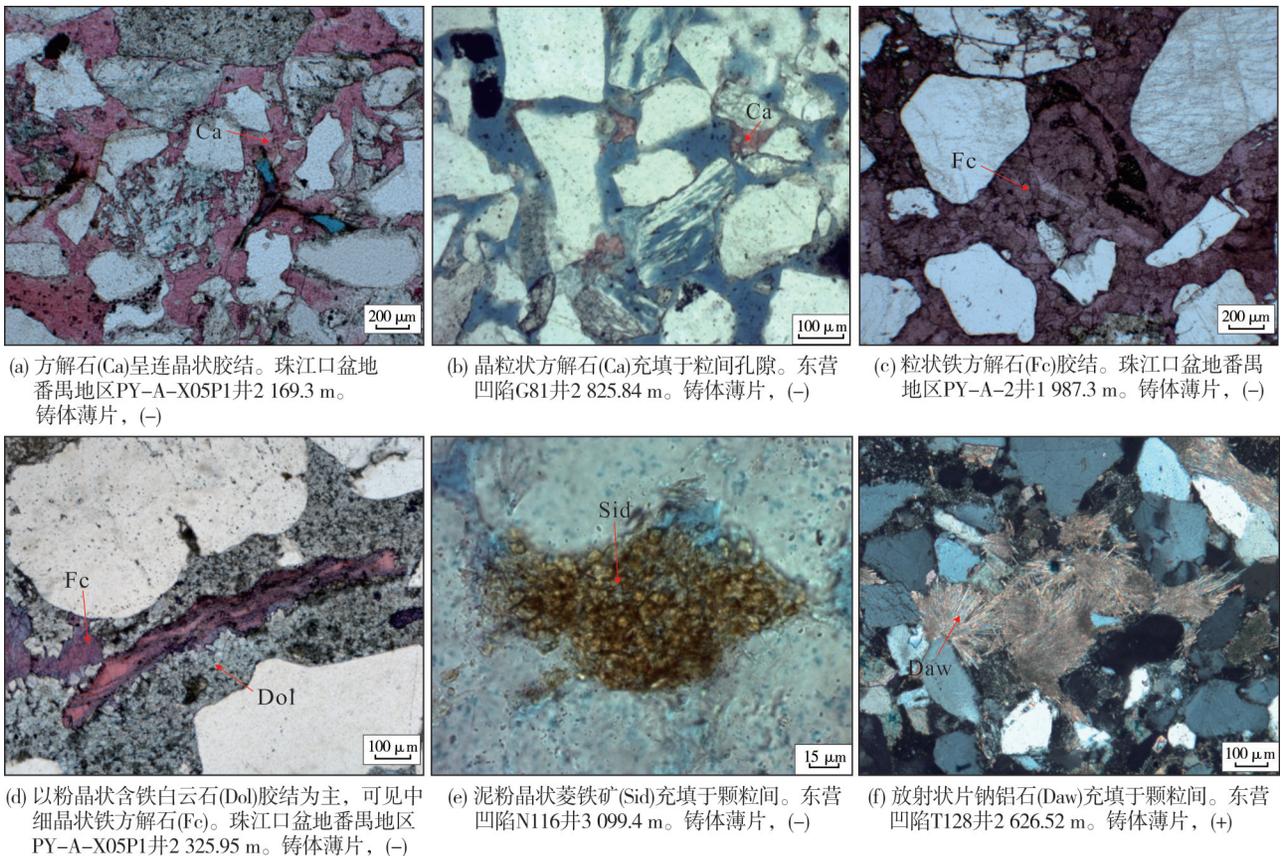


图1 碎屑岩储层不同碳酸盐胶结物的微观特征

Fig. 1 Microscopic characteristics of different carbonate cements in clastic reservoirs

## 1.2 胶结期次

碳酸盐胶结物具有多期次的特征,可以形成于同生期—晚成岩期的各个阶段,早期碳酸盐胶结物可发生溶解或交代作用而形成晚期的碳酸盐胶结物<sup>[6,16-17]</sup>。自浅层到深层氧化带、硝酸盐还原带、锰还原带、铁还原带、硫酸盐还原带、甲烷生成带、有机质脱羧带可分别形成不含铁的方解石和白云石、富铁锰的方解石和白云石、菱锰矿、菱铁矿、不含铁的方解石和白云石、铁方解石和铁白云石、含铁菱铁矿和含铁菱铁矿、含铁碳酸盐<sup>[11]</sup>。

## 1.3 分布特征

碳酸盐胶结物分布模式多样(图2),常在砂泥

岩接触面及其附近(图2a)<sup>[3-4,6,17-25]</sup>分布,可呈现多种胶结样式,如砂岩层整体被致密胶结(图2a中①)<sup>[4,19,20]</sup>、顶底均被胶结<sup>[3-4,6,17,19,22-23]</sup>、仅底部被胶结(即“底钙”,图2a中的③和④)<sup>[18,20]</sup>、仅顶部被胶结(即“顶钙”)<sup>[21,24-25]</sup>。此外碳酸盐胶结物也可在高孔高渗带<sup>[26-27]</sup>、富生物碎屑层(图2b中①)<sup>[9,19,28-30]</sup>、油水界面<sup>[26,31]</sup>、沿层理方向<sup>[20,32-33]</sup>(图2b中②和③)、潜流带和渗流带交接处<sup>[32]</sup>、断层(图2c中①)或裂缝附近<sup>[20,34]</sup>等分布,在富生物碎屑层中,由于生物碎屑丰度和产状的差异,碳酸盐胶结层可呈现不同的产状<sup>[29]</sup>。碳酸盐胶结物宏观分布规模不一(图2),常呈结核状分布<sup>[5,19-20,29,35]</sup>,结核可呈球状、扁球形、长球形、平板形等规则和不规则形态

(图2a—2e),且结核大小不一,可小至几厘米(图2d中①),也可长达数米(图2b—2e),也可以侧向

分布稳定延伸达数百至数千米的连续胶结层存在<sup>[4-6,9,21,24-25,29,35]</sup>。

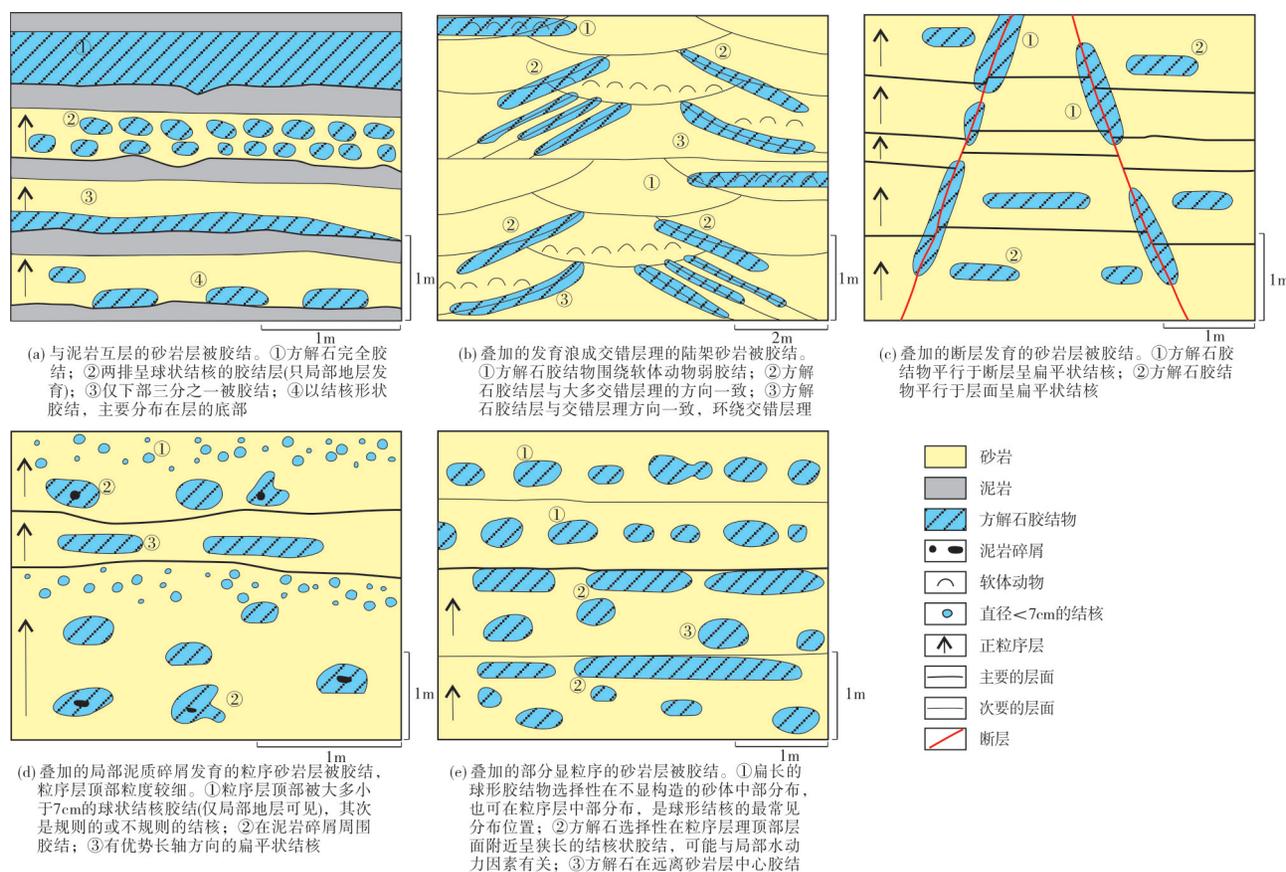


图2 意大利平宁山北部古近系—新近系露头砂岩中方解石胶结物的差异分布样式(据文献[20])

Fig. 2 Differential distribution patterns of calcite cements in Paleogene-Neogene sandstones exposed in the northern Apennines, Italy (cited from reference [20])

## 2 碳酸盐胶结物的物质来源

碳酸盐胶结物的物质来源可分为内源和外源2种,其中内源是指来源于砂体内部的充填于砂体孔隙中的流体,外源则是指来源于砂体以外的流体及其携带的各种物质。

### 2.1 内源

碳酸盐胶结物的内部物质来源主要包括碳酸盐岩岩屑和生物碎屑的溶解、钙长石的溶解、原生沉积流体及铝硅酸盐的水化作用等,此外,早期碳酸盐胶结物溶解和暗色矿物的溶解或交代作用等也可以提供一定的物质来源。

#### (1) 碳酸盐岩岩屑和生物碎屑的溶解

与陆相地层相比,海相地层更富有生物碎屑<sup>[36]</sup>,碳酸盐岩岩屑和生物碎屑的溶解是海相地层

中一种重要的内部物质来源,可以为碳酸盐胶结提供钙源和碳源<sup>[2,5,25,28-29,37-38]</sup>。尤其是对于浅海相地层,生物碎屑被认为是砂岩内碳酸盐胶结物的最主要物质来源<sup>[29]</sup>。此外,碳酸盐岩岩屑的溶解还能提供部分镁源<sup>[1,35,37]</sup>。

#### (2) 钙长石的溶解

在一定的物理化学条件下,斜长石中的钙长石与 $H^+$ 反应,生成高岭石,形成各种类型的溶蚀孔隙,释放出 $Ca^{2+}$ 进入溶液,该反应提供的 $Ca^{2+}$ 可以进入到碳酸盐胶结物中<sup>[2,12,16,23,38]</sup>。当钙长石含量丰富时,它的溶解是碎屑岩碳酸盐胶结物钙离子的重要内部来源之一。

#### (3) 原生沉积流体

原生沉积水可以为碳酸盐胶结物提供一定的物质来源,碳酸盐矿物可从过饱和的原生沉积水沉淀<sup>[2,16]</sup>。原生沉积水的化学性质主要受沉积环境及

气候影响<sup>[39-40]</sup>,处于干旱封闭的盐湖环境下的化学物质容易按照氧化物→磷酸盐矿物→硅酸盐矿物→碳酸盐矿物→硫酸盐矿物→卤化物矿物的顺序发生化学沉积分异作用而逐渐沉淀。

#### (4) 铝硅酸盐矿物的水化作用

在各种岩屑尤其是火山岩岩屑的构成矿物中,铝硅酸盐矿物与水接触后会转变成含水或含水较多的矿物,该过程可以提供一定的钙源<sup>[2,40]</sup>,如火山岩岩屑的绢云母化等。尤其是在火山岩岩屑发育的地层,它也可以作为一种重要的钙源。

#### (5) 其他途径

其他途径包括早期碳酸盐胶结物的溶解及暗色矿物的溶解或交代作用等。早期碳酸盐胶结物的溶解可以为晚期碳酸盐(主要是含铁碳酸盐)胶结物的形成提供一定的物质来源<sup>[6,16-17]</sup>。砂岩中暗色矿物溶解或交代作用也可以为含铁碳酸盐胶结物的沉淀提供部分铁和镁源<sup>[4,6,18-19]</sup>,不少学者在研究中发现铁白云石交代黑云母并沿着黑云母节理面发育的现象<sup>[4,19]</sup>。

## 2.2 外源

碳酸盐胶结物的外部物质来源包括泥岩的成岩作用和来源于砂体以外的碳酸盐岩的溶解等,其中泥岩的成岩作用是碳酸盐胶结物的一种主要的外部物质来源。

#### (1) 泥岩的成岩作用

泥岩内部的有机质、碳酸盐矿物、黏土矿物等的成岩作用均能为碳酸盐胶结提供重要的物质来源。泥岩中有机质在不同埋深不同作用带发生不同的地球化学反应,从浅到深分别为细菌氧化作用、硫酸盐还原作用、细菌发酵作用、有机酸脱羧作用等,这些反应均可以生成 $\text{CO}_2$ <sup>[41]</sup>,尤其有机酸脱羧作用可以为碳酸盐胶结提供重要碳源<sup>[2-4,6,16-18,22-23,38,42]</sup>。泥岩中碳酸盐矿物发生溶解,可以提供一定的碳源和钙源<sup>[4,23]</sup>。随着埋深的增加,泥岩中黏土矿物不断发生转化,尤其是蒙脱石向伊利石逐渐转化,可以释放出大量 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 等金属阳离子,促进含铁碳酸盐胶结物的形成<sup>[2-4,6,12,16-18,23,43]</sup>。富含金属离子、 $\text{CO}_2$ 和碳酸氢盐的流体可以从泥岩进入砂岩,从而为砂岩中碳酸盐胶结提供物质基础。

#### (2) 其他途径

在埋藏过程中储层可能会受到其他流体如深部流体<sup>[16,34,44-47]</sup>、大气水<sup>[48-49]</sup>、海水<sup>[21,35]</sup>等的影响,这

些外部流体也可以为碳酸盐胶结提供部分物质来源。其中,部分富铁、镁质深部流体还能提供一定量的铁源和镁源,从而促进铁白云石的形成<sup>[47]</sup>。此外,来源于砂体以外的碳酸盐岩的溶解也可以提供一定的物质来源<sup>[5,50]</sup>。

## 3 碳酸盐胶结物成因机制及分布规律

### 3.1 碳酸盐胶结物成因机制

碳酸盐胶结物可通过不同的成因机制形成,这些机制主要包括砂泥岩协同成岩作用、蒸发作用、生物碎屑溶解再沉淀作用、沉积速率控制作用、热对流作用、深部热流体作用等。

#### 3.1.1 砂泥岩协同成岩作用

泥岩的成岩作用和砂泥岩之间的物质传输是砂岩中碳酸盐胶结的关键。扩散作用作为砂泥岩之间短距离物质传输的主要机制越来越得到认可<sup>[4,17,42,51]</sup>,但关于早期砂泥岩之间的物质传输方式,也有学者认为是泥岩中压实流体经平流作用运移至砂岩<sup>[4,52]</sup>。砂泥岩协同成岩作用形成碳酸盐胶结最常见的成因机理为:泥岩中有机质在不同埋深发生不同地球化学反应,这些反应均可以生成 $\text{CO}_2$ <sup>[41,53]</sup>,提供重要碳源;而黏土矿物尤其是蒙脱石在埋藏过程中会发生伊利石化,释放大量的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等金属阳离子<sup>[43]</sup>;此外,泥岩中碳酸盐矿物的存在和被溶解也常可以为砂岩中胶结物的形成提供重要碳源和钙源<sup>[4,23]</sup>,使得泥岩和砂岩之间产生了浓度梯度。在浓度梯度作用下,富含金属离子、 $\text{CO}_2$ 和碳酸氢盐的流体经过扩散作用从泥岩进入砂岩<sup>[51]</sup>。该机制得到了成岩数值模拟结果的验证<sup>[17]</sup>:如图3所示,在简化的一维砂泥岩系统成岩数值模拟中(图3a),随着模拟时间增加,泥岩中同一位置示踪剂和各离子浓度逐渐减小,泥岩和砂岩之间示踪剂和各离子浓度差异逐渐减小(图3b—3f);同一模拟时间,随着距砂泥界面距离的增加,砂岩中各物质浓度先减小后基本稳定(图3b—3f),反映了泥岩中离子向砂岩中扩散的规律。在新的物理化学环境中,初始的物理化学平衡被打破,因此,使碳酸盐胶结物首先在砂泥岩界面发生沉淀(图2a)。但也有学者认为突变接触的砂泥之间由于存在浓度梯度可以发生物质传输,而渐变接触的砂泥之间由于浓度梯度太小几乎无物质传输<sup>[42]</sup>。

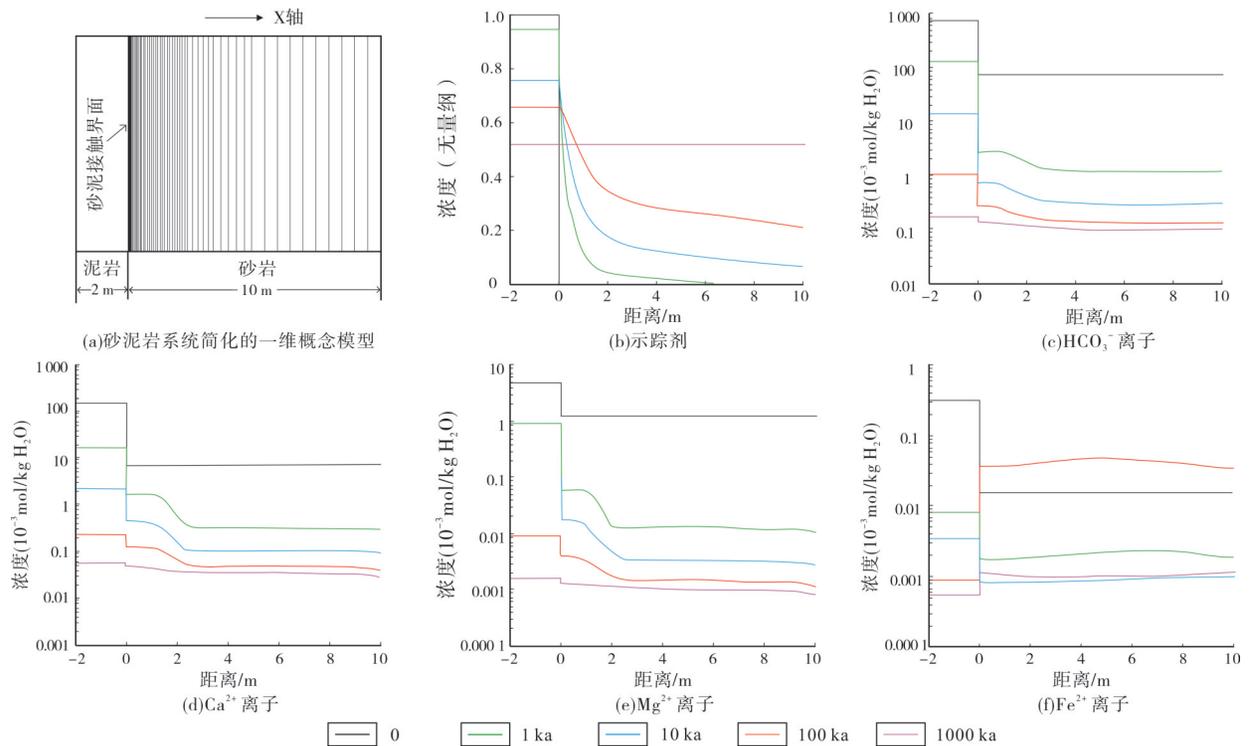


图3 一维砂泥岩系统中距砂泥岩界面不同位置不同模拟时间各物质浓度变化(据文献[17])

Fig. 3 Variations of ion concentrations with different distances from the sandstone–shale interface and different modelling time of a simplified sandstone–shale system (cited from reference [17])

在砂泥岩界面附近形成的主要为晚期含铁碳酸盐胶结物<sup>[4,23]</sup>。钟大康等<sup>[22]</sup>从泥岩成岩演化的角度指出:泥岩在浅—中等埋藏条件下主要排出低矿化度、富含有机酸的流体,在砂泥岩界面附近溶蚀作用强于内部;而在深埋条件下,从泥岩中排出的是富含金属离子的高矿化度碱性流体,进入砂岩后易在砂泥岩界面形成胶结,因此砂泥岩界面附近胶结强于内部,且多形成含铁碳酸盐胶结。此外,砂泥岩协同成岩作用还可以形成早期的碳酸盐胶结物,一般主要是方解石胶结物<sup>[4,22]</sup>,形成的方解石均匀分布在砂岩内部<sup>[22]</sup>或主要分布在砂岩中部<sup>[4]</sup>或在砂泥岩界面分布<sup>[17]</sup>。

不同的砂泥岩组合方式及砂泥岩相对厚度比例对砂泥岩界面附近的胶结程度影响很大<sup>[22]</sup>。当砂岩厚度为中—厚层时,常表现为从砂岩内某一点到砂泥岩界面,碳酸盐胶结物含量逐渐增加的特征<sup>[3-4,6,17,23,42]</sup>(图4)。

统计表明,南堡凹陷滩海地区沙一段碳酸盐胶结物含量随着距离砂泥岩界面的增大而减小:当距砂泥岩界面距离大于1.3 m时,碳酸盐胶结物含量普遍小于10%;当砂岩厚度较薄时,砂岩几乎被全

部胶结。因此,在深水浊积岩沉积远端或朵叶相(图5)、近岸水下扇的扇缘、滩坝的滩席和坝侧缘常见砂体被全部胶结的特征<sup>[4-6,36,54]</sup>。

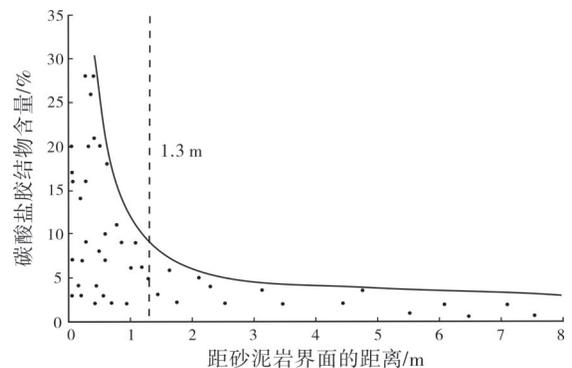


图4 南堡凹陷滩海地区沙一段碳酸盐胶结物含量与距砂泥岩界面的距离关系

Fig. 4 Relationship between abundances of carbonate cements and distances to mudstone–sandstone interface of the Es1 reservoir in the offshore area of Nannpu Sag

### 3.1.2 蒸发作用

蒸发作用形成碳酸盐胶结物的机理在于,蒸发量大于降水量时,处于沉积期或准同生期的沉积物颗粒间水不断蒸发,使得孔隙水浓度逐渐变大,引起孔隙水过饱和而发生沉淀。同时随着蒸发作用的

进行,沉积物下部与海(湖)水沟通的孔隙会从海(湖)水中获取补给,就像泵汲一样,使沉积物粒间水的含盐度大大提高,促进碳酸盐矿物沉淀。Friedman等<sup>[55]</sup>将这一作用称为“毛细管浓缩作用”,指出毛细管浓缩作用可以形成高Mg/Ca的卤水。

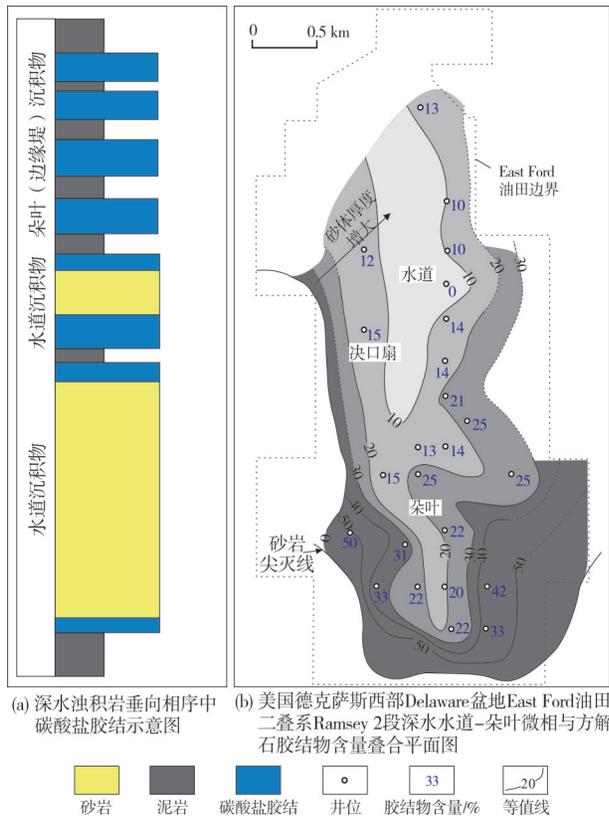


图5 碳酸盐胶结物在深水砂岩垂向和平面相中的分布 (据文献[5]和[36])

Fig. 5 Distribution of carbonate cements in vertical and planar facies of deep-water sandstones (cited from reference [5,36])

Hsü等<sup>[56]</sup>通过实验证明了这一机理,并指出实验证实通过蒸发泵诱发的流动速率仅由蒸发作用直接控制。在相同的蒸发条件下,通过粗砂岩和细砂岩的线性流体速率近似相同,然而流动遵循达西定律,由于介质渗透率固定,因此在相对非渗透的粉砂岩中的水力梯度实际上比在高渗透的砂岩中大得多,由蒸发作用诱导的水力向上运动可以作为在气候干热的滨岸平原将含镁流体运移到相对非渗透性沉积物中的一种有效机制。通过岩心和显微观察,姜洪福等<sup>[33]</sup>对青海湖现代滨岸砂体沉积层理和钙质致密层开展研究,认为塔里木盆地东河塘石炭系CⅢ油层滨岸厚层块状砂岩中大量发育的沿斜层理分布的钙质致密胶结层是蒸发泵作用形成的:在蒸发泵作用下,富含钙离子的卤水不断蒸发

浓缩,逐渐沿相对较高渗的斜层理沉淀,最终形成钙质致密层。

蒸发作用主要发生在气候干热、蒸发量大于降水量的地区(如滨岸),主要形成白云石、方解石等胶结物<sup>[33,57]</sup>。蒸发泵作用现已被普遍用来解释准同生白云岩的成因<sup>[58-60]</sup>。

### 3.1.3 生物碎屑溶解再沉淀作用

生物碳酸盐与方解石胶结物的平衡面(图6中A和B)存在差异,生物碳酸盐在沉积埋藏过程中更易发生溶解,当生物碎屑发生溶解,孔隙水中钙质浓度超过方解石胶结物的平衡面后优先在成核点(如图6中①、②和③)附近胶结形成钙质结核<sup>[29]</sup>(图6),它的形成会降低结核附近孔隙水中溶解的钙质浓度,促进结核周围的生物碎屑溶解,溶解离子沿着浓度梯度扩散和以胶结物的形式在结核表面沉淀,结核不断生长,直至单位时间生物碎屑溶解量与成核点周围方解石胶结物沉淀量达到平衡(图6中围绕成核点以 $r_i$ 为半径的周围区域),最终演变成钙质团块<sup>[29]</sup>。当生物碎屑供应充足,相邻成核点间距较小(如图6中①和②),不同成核点的影响范围发生重叠,钙质结核在生长过程中逐渐发生合并(图6),最终可形成侧向连续、延伸广的胶结层<sup>[29]</sup>。

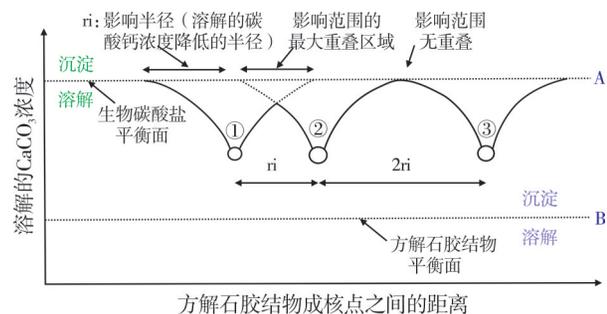


图6 不同方解石胶结物成核点的影响范围及相互作用 (据文献[29])

Fig. 6 Influence ranges and interaction of several calcite cement nuclei (cited from reference [29])

对于在成核点附近逐渐沉淀和钙质团块发生合并这种认识,学者Bjørkum等<sup>[61]</sup>通过对英格兰下侏罗统露头Bridport砂岩中侧向连续展布的方解石胶结层的研究得到了证实:胶结层的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-2.2\text{‰}$ ~ $-0.5\text{‰}$ ,而 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-9.2\text{‰}$ ~ $-4.8\text{‰}$ 的范围内变化,而且 $\delta^{18}\text{O}$ 值围绕少数核心呈放射状向外减小,表明侧向连续展布的方解石胶结层的主要物质来源是生物碳酸盐岩岩屑,是从若干成核点处开始逐渐向外生长,不同成核点处碳酸盐

胶结同步发生,最终发生合并。碳酸盐胶结层的几何形状受控于生物碎屑的丰度和原始分布,根据生物碎屑的丰度差异,可分别形成离散的结核、层控结核和连续胶结层<sup>[29]</sup>(图2b中①,图7a—7c)。

珠江口盆地西江凹陷番禺地区珠江组的岩心中可见碳酸盐胶结呈离散结核状和连续胶结层(图7a),镜下显示其主要胶结矿物为铁方解石,常与生

物碎屑伴生(图7d,7e),整体呈基底-孔隙式胶结。2口取心井9块样品的碳氧同位素测试表明其 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-2.8\text{‰}$ ~ $-1.03\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-10.2\text{‰}$ ~ $-8.78\text{‰}$ ,反映生物碎屑的溶解为碳酸盐胶结物提供了主要碳源。在岩心标定测井的基础上,测井识别和井间对比分析表明其可以形成侧向延伸达数百到数千米的胶结层(图8)。

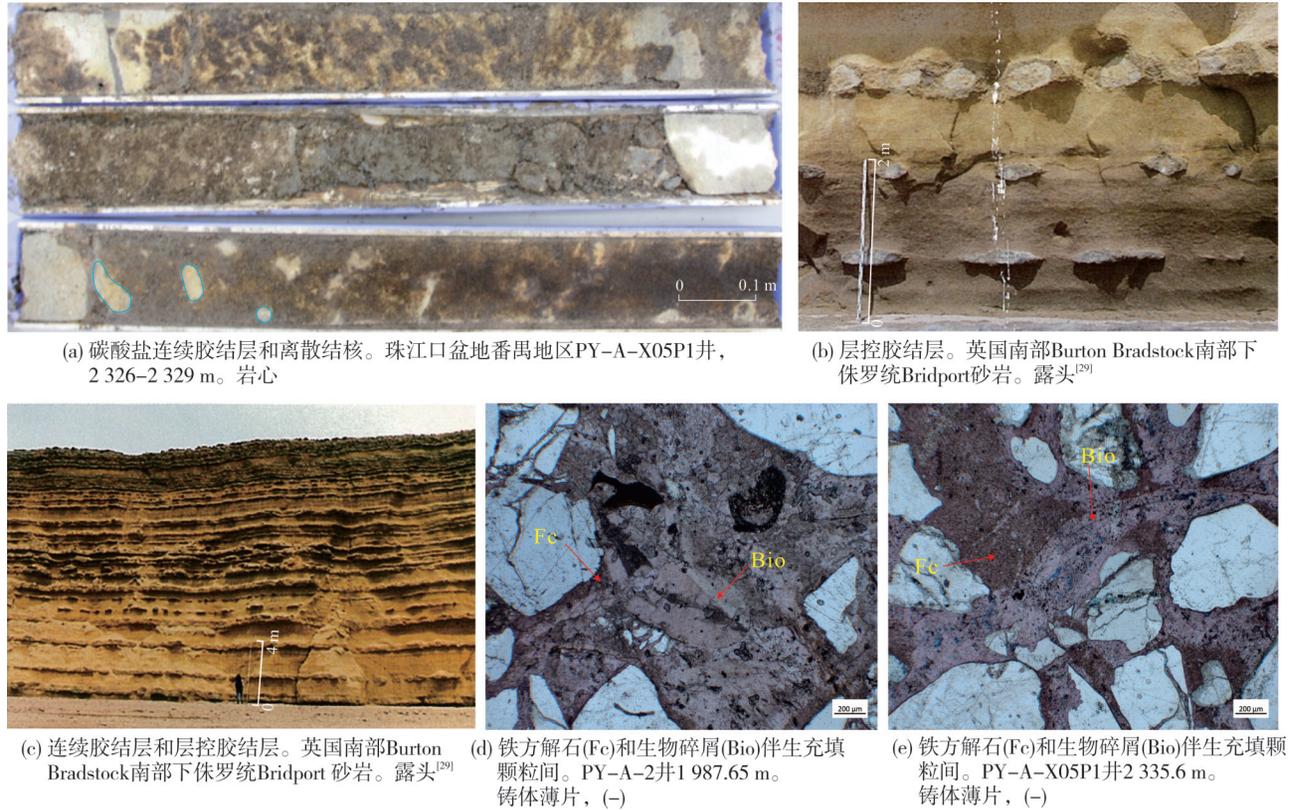


图7 滨浅海相砂岩中碳酸盐胶结物岩心、露头及镜下特征

Fig. 7 Core, outcrop, and microscopic characteristics of carbonate cements in coastal-shallow marine sandstones

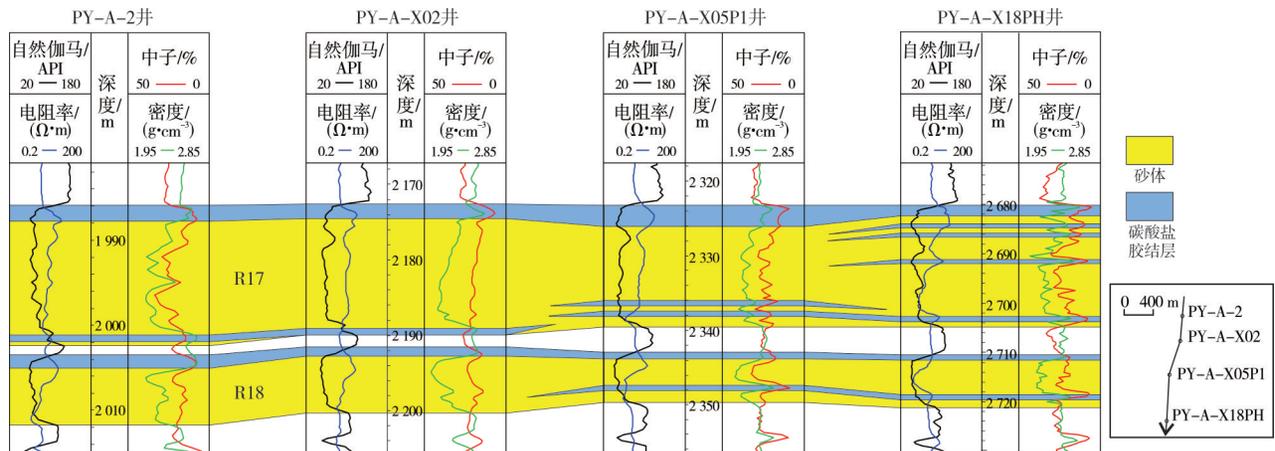


图8 番禺地区珠江组R17和R18油层碳酸盐胶结层近南北向连井对比剖面

Fig. 8 North-south well connection correlation profile of carbonate-cemented layers of the R17 and R18 oil layers of Zhujiang Formation in the Panyu area

与陆相环境相比,海相尤其是滨浅海相沉积环境富含碳酸盐和硅质生物碎屑,可分别作为  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  的内部来源,促进早成岩时期方解石或硅质胶结<sup>[36]</sup>。Walderhaug 等<sup>[29]</sup>指出浅海相砂岩内部方解石胶结物的唯一重要来源通常是生物碳酸盐岩岩屑,因此这是一种在滨浅海相易发生的碳酸盐成因机制。该机制形成的胶结物以(铁)方解石为主,这种机制为滨浅海相侧向延伸广的连续碳酸盐胶结层提供了一种合理成因解释<sup>[9,25,29,57,62]</sup>。

### 3.1.4 沉积速率控制作用

缓慢的沉积速率延长了沉积物的保留时间,促进了  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  等离子从上覆海水或海底附近细菌活动带扩散进入沉积物孔隙水中,因此促

进了早期碳酸盐胶结物的形成<sup>[9,21,24,35]</sup>。一旦沉积物中方解石胶结物的成核作用发生(如在生物碎屑周围),就形成了上覆海水和孔隙水碳酸盐沉淀位置之间的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的化学梯度<sup>[24]</sup>。Kantorowicz 等<sup>[9]</sup>指出沉积速率对海相砂岩碳酸盐胶结样式有重要影响:随着沉积速率增大,形成的碳酸盐胶结层的连续性变差(图9)。当沉积物缓慢埋藏时,沉积物发生氧化作用,易形成侧向连续稳定分布的胶结层(图9中的路径A);当沉积物沉积速率增大,沉积物以发生硫酸盐还原作用为主,易形成层控结核(图9中的路径B);随着沉积物沉积速率进一步增大,沉积物以发生细菌发酵作用为主,易形成离散结核(图9中的路径C)。

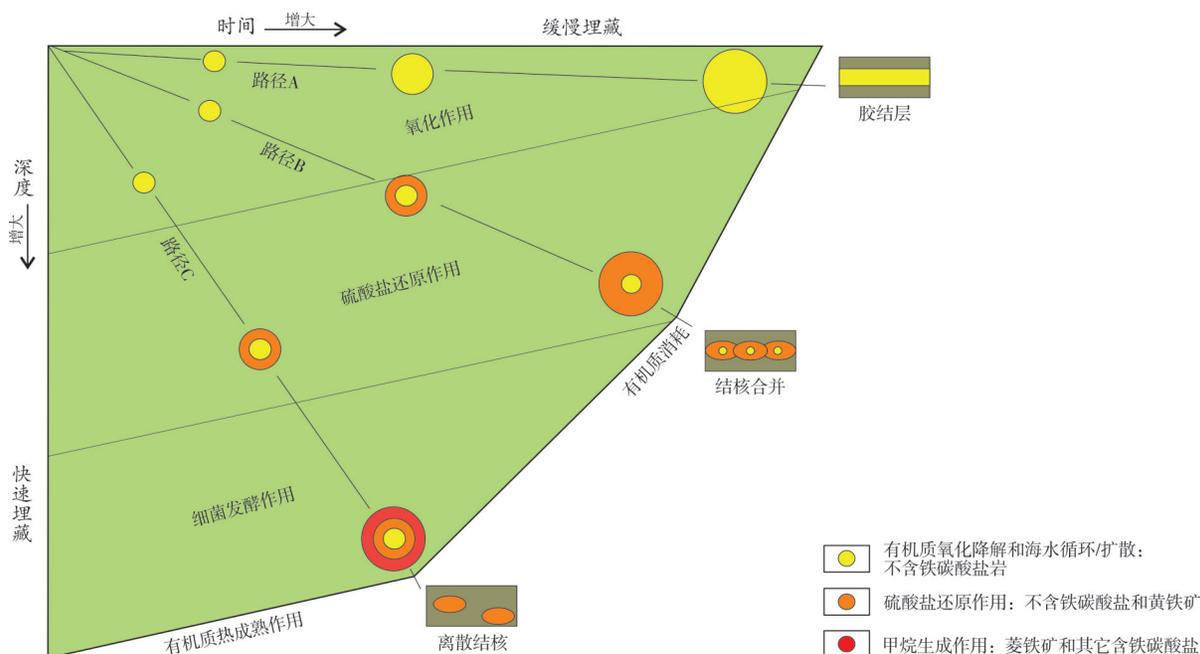


图9 海相砂岩中沉积速率对碳酸盐胶结样式的影响(据文献[9])

Fig. 9 Schematic illustration of the impact of deposition rate on carbonate cementation styles in marine sandstones(cited from reference [9])

这种机制下的碳酸盐结核生长从沉积物-水界面下部开始,但是在成岩作用中会持续发生<sup>[35]</sup>,形成的胶结物以方解石和铁白云石为主。海泛的发生会降低沉积速率,延长沉积物作用时间<sup>[9,21,35]</sup>;同时它有利于生物碎屑的富集<sup>[21,30,36]</sup>,生物碎屑作为成核点,可促进碳酸盐胶结。因此,常见碳酸盐胶结物富集于准层序界面、海侵面和最大海泛面的下部<sup>[21,24-25,30,35-36,57]</sup>。

### 3.1.5 热循环对流作用

热循环对流是两块平板间所夹的流体在下部受热、上部冷却时所产生的循环对流形式,其主要驱

动力来自于温度梯度导致的微小密度差<sup>[63]</sup>。在热循环对流传输机制下,热流体从砂体的底部由下向上流动,在上倾部位急转向上垂直到顶部,流体再沿砂体顶界由上而下流动,在下倾部位急转向下垂直到砂体底部,最终形成热循环对流<sup>[64]</sup>。对流过程中的温度变化会引起溶解度对温度变化敏感的自生矿物的重新分布<sup>[65]</sup>。由于石英的溶解度与温度呈正比,而碳酸盐矿物的溶解度与温度呈反比,因此在热对流过程中,会将石英从热域迁移至冷域沉淀,而将碳酸盐矿物从冷域迁移至热域沉淀,导致碳酸盐胶结物在砂体下部或构造低部位富集<sup>[66]</sup>(图10)。

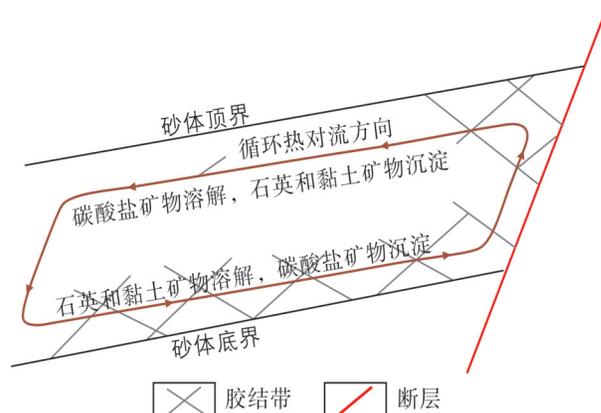


图10 东营凹陷古近系深层碎屑岩薄板状热循环对流成岩模式(据文献[67])

Fig. 10 Thermal convection diagenetic model of thin-plate type in the deep Paleogene clastic rocks in the Dongying Sag (cited from reference [67])

热对流的发生与否取决于瑞利数( $R$ )的大小。Wood等<sup>[63]</sup>的理论和实验表明当平板倾角不为 $0^\circ$ 时,更易产生热对流。沉积盆地中能否发生热对流可根据 $R=1.2 \times 10^{-2} \times \Delta T/H * K * H^2$ 判断,其中 $\Delta T/H$ 为地温梯度(单位: $^\circ\text{C}/\text{m}$ ), $K$ 为地层渗透率(单位: $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), $H$ 为地层厚度(单位: $\text{m}$ )<sup>[68]</sup>,因此热对流更易发生在地层倾角大渗透性好的地层。而在等温线倾斜的场合总能产生热对流,这种热对流一般称为非瑞利对流,发生这种热对流的介质包括火成侵入体、盐丘和活跃断层周围的岩体等<sup>[68]</sup>。该机制形成的碳酸盐胶结物以(铁)方解石、铁白云石为主<sup>[64,69]</sup>。

### 3.1.6 深部热流体作用

热流体是其温度比所经围岩地层温度高的地质流体<sup>[70]</sup>,主要包括壳源热流体、烃源热流体和幔源热流体3种类型<sup>[71]</sup>,通常沿断裂从地层深部向浅部运移<sup>[72]</sup>。热流体富含 $\text{CO}_2$ 等挥发组分,能提供大量热量,促进有机质热演化和短期内发生大规模生烃作用<sup>[73]</sup>,加速黏土矿物的转化<sup>[44-47]</sup>,使砂岩储层发生热液蚀变作用而形成一系列热液矿物组合等<sup>[44-47,74]</sup>,引起碳酸盐岩的白云石化<sup>[75-76]</sup>。深部热流体作用形成碳酸盐胶结物的机理在于,富含 $\text{CO}_2$ 的高温热流体沿断层上涌,在流体向上运移过程中,可对围岩等进行溶蚀,长石等矿物的溶蚀使流体的盐度和碱度增大,当富 $\text{CO}_2$ 的热流体温度降低到一定程度时,会造成储层中绿泥石等黏土矿物异常演化,释放出大量的 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ,促进铁白云石等矿物的沉淀<sup>[45]</sup>(图11)。

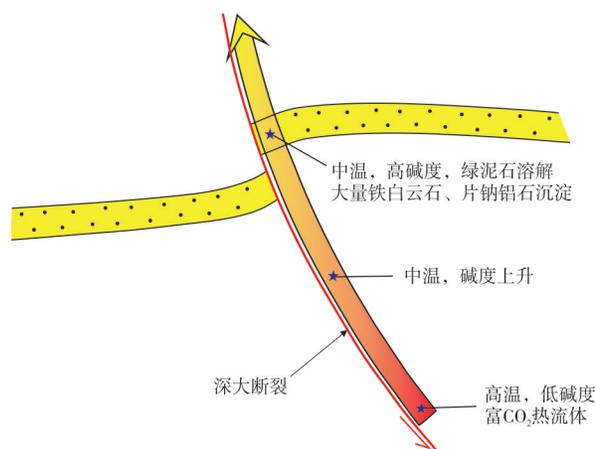


图11 深部富 $\text{CO}_2$ 热流体作用下铁白云石的形成模式示意图(据[45]修改)

Fig. 11 Schematic illustration of ankerite formation pattern under the action of deep  $\text{CO}_2$ -rich hydrothermal fluid (modified from reference [45])

这种机制易发生在热流体发育且有深大断裂沟通的地区,形成的碳酸盐胶结物以铁白云石为主,还常见片钠铝石和菱铁矿等<sup>[44-47,74]</sup>,碳酸盐胶结物的分布受热流体和深大断裂的控制。

除上述几大成因机制外,大气水-海水混合作用<sup>[38,50,77]</sup>、重结晶作用<sup>[42,54,78]</sup>等也可形成碳酸盐胶结物。有时碳酸盐胶结并不是单一机制形成的,而是多种机制共同作用的结果<sup>[21,30,79]</sup>。El-Ghali等<sup>[79]</sup>通过对巴黎盆地河流和浅海相砂岩碳酸盐胶结物的研究表明,生物碎屑的存在进一步促进了准层序界面、海侵面和最大海泛面下的方解石和白云石胶结。

### 3.2 不同成因机制下碳酸盐胶结物分布规律

在对不同成因机制论述的基础上,对各主要成因机制下碳酸盐胶结物的分布特征、矿物类型与控制因素等进行了总结(表1)。砂泥岩协同成岩作用主要发生在三角洲、浊积岩等砂泥配置良好的相带,碳酸盐胶结物主要分布在砂泥界面附近,形成的胶结矿物类型以铁方解石和铁白云石为主,方解石和白云石也较常见。蒸发作用主要发生在气候干热、蒸发量大于降水量的地区,如滨岸和潟湖相,碳酸盐胶结物分布无明显规律,矿物类型以白云石、方解石为主。生物碎屑溶解再沉淀作用多发生在滨浅海、海陆过渡相,碳酸盐胶结物分布在富生物碎屑层,形成的胶结矿物类型以(铁)方解石为主。沉积速率控制作用主要发生在海陆过渡相、滨浅海相地层,碳酸盐胶结物在准层序界面、海侵面

或最大海泛面下常见,矿物类型以方解石和铁白云石为主。热对流作用易发生在地层倾角大、渗透性好的地层或岩浆侵入体、盐丘等特殊地质体周围,胶结物分布在有明显温度梯度的地质体或砂体下部,形成的胶结矿物类型以(铁)方解石、铁白云石为主。深部热流体作用易发生在热流体发育且有深大断裂沟通的地区,胶结物分布在热流体活动带及断层附近,矿物类型以铁白云石为主,也常见片钠铝石和菱铁矿。

总体而言,不同成因机制下形成的碳酸盐胶结物的分布特征、矿物类型及控制因素等存在一定差异,但不同的成因机制形成的碳酸盐胶结物可能有相同的矿物类型和相似的分布特征(表1)。对比陆相和海相地层,在陆相碎屑岩储层中,砂泥岩协同成岩作用是形成碳酸盐胶结的最重要机制,但在海陆过渡相—海相地层中,除了砂泥岩协同成岩作用外,生物碎屑溶解沉淀作用、沉积速率控制作用也是重要的碳酸盐胶结物形成机制。

表1 不同成因机制下形成的碳酸盐胶结物的分布规律

Table 1 Distribution of carbonate cements formed under different genetic mechanisms

成因机制	发育相带/地区	分布位置	矿物类型	分布控制因素	实例
砂泥岩协同成岩作用	三角洲、浊积岩等砂泥配置良好相带	砂泥岩界面及附近更常见,砂体内部也可分布	一般以铁方解石和铁白云石为主	邻近泥岩	东营凹陷沙三段浊积岩 <sup>[4]</sup>
蒸发作用	气候干热、蒸发量大于降水量地区	无明显规律,可沿层理分布	以白云石、方解石为主	古地理条件等	塔里木盆地东河塘石炭系滨岸砂体 <sup>[33]</sup>
生物碎屑溶解再沉淀作用	以海陆过渡相、滨浅海相为主	在富生物碎屑层发育	以(铁)方解石为主	原始生物碎屑的丰度和产状	英国南部侏罗统浅海相Bridport砂岩 <sup>[29]</sup>
沉积速率控制作用	以海陆过渡相、滨浅海相为主	在准层序界面、海侵面或最大海泛面下常见	以方解石和铁白云石为主	沉积速率	挪威Troll油田中—上侏罗统Viking组浅海相砂岩 <sup>[9]</sup>
热循环对流作用	地层倾角大渗透性好的地层及岩浆侵入体等地质体	有明显温度梯度的砂体下部或岩浆侵入体等地质体	以(铁)方解石、铁白云石为主	温度梯度	黄骅坳陷北大港潜山下石盒子组砂岩 <sup>[69]</sup>
深部热流体作用	热流体发育、有深大断裂沟通的地区	热流体活动及断层附近	以铁白云石为主,常见片钠铝石和菱铁矿	热流体及断层	莺歌海盆地中新统砂岩 <sup>[44]</sup> , 松辽盆地南部泉头组砂岩 <sup>[45]</sup>

#### 4 需要注意的问题

在对成因机制及分布规律论述的基础上,鉴于碳酸盐胶结物物质来源复杂,海陆过渡相—海相地层与陆相地层沉积控制因素及物质组分存在差异,以及不同的成因机制形成的碳酸盐胶结物可能有相同的矿物类型和分布特征,因此应特别注意以下几个问题:

(1)应注意利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值判断物质来源的不确定性。碳酸盐胶结物成因分析最常见的手段是碳氧同位素测试,依据 $\delta^{13}\text{C}$ 值确定其物质来源,进一步分析其成因。但碳酸盐胶结物物质来源复杂,仅依据 $\delta^{13}\text{C}$ 判断其来源存在以下一些问题:①碳酸盐岩岩屑或生物碎屑的存在会对结果产生干扰;②碳酸盐胶结物常常表现为多期次、多类型的特征;③尽管不同来源的 $\text{CO}_2$ 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在差异<sup>[2]</sup>,而且处于不同演化阶段的有机质生成的 $\text{CO}_2$ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也存在差异<sup>[41]</sup>,但这些来源的 $\text{CO}_2$ 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在一定的重叠

区间;④即使对于单一期次、单一类型的碳酸盐胶结物,其碳源也常常表现为多源混合的特征<sup>[5]</sup>。对于问题①和②,主要可以通过改进测试方法,利用微钻取样分析或激光微探针分析等加以解决,这些方法可以大大地降低母岩组分或其他类型或期次碳酸盐胶结物对 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响<sup>[80-81]</sup>。对于问题③和④,可以以微观精细表征为基础,结合研究区地质背景分析,将碳氧同位素分析和其他测试手段(如流体包裹体测试)相结合来综合分析碳酸盐胶结物的成因。通过微观精细表征,初步明确碳酸盐胶结物的类型、特征、形成先后关系等;再结合研究区的地质条件和碳同位素结果,分析可能的流体和物质来源;最后通过碳氧同位素组成和流体包裹体均一温度等对结果进行约束,从而明确碳酸盐胶结物的成因<sup>[3-4]</sup>。

(2)在海陆过渡相—海相地层中,应重视层序地层和沉积环境对碳酸盐胶结的作用。海陆过渡相—海相地层与陆相地层的沉积控制因素及物质组

分存在差异,在海陆过渡相—海相地层中,沉积物受到全球海平面变化的影响,海泛的发生会降低沉积速率,而且海洋环境中尤其是滨浅海环境更富有生物碎屑,这些因素使得层序地层和沉积环境对海陆过渡相—海相地层中碳酸盐胶结起着重要的作用,尤其是对早期的碳酸盐胶结有重要影响,需要给予重视。

(3)应注意相同的矿物类型(如“铁白云石”)或相似的分布特征(如“顶钙”)成因的多解性。经典的铁白云石形成模式认为铁白云石主要分布在相对深埋地层,是晚期成岩阶段的产物,这主要与泥岩中黏土矿物的转化尤其是蒙脱石向伊利石的转化提供 $\text{Fe}^{3+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 有关<sup>[2-4,6,12,16-18,23,43]</sup>。但深部热流体作用<sup>[34,44-47,74]</sup>、沉积速率控制作用<sup>[21,35]</sup>、大气淡水淋滤作用<sup>[1,37]</sup>等也可形成铁白云石。在陆相地层中,“顶钙”的形成一般受控于邻近泥岩,是砂泥岩协同作用的结果<sup>[3-4,6,17-19,22-23]</sup>。但在海相地层中,“顶钙”的形成可能与海泛面或准层序界面等密切相关<sup>[21,24,35]</sup>,或者受到生物碎屑富集的控制<sup>[25]</sup>。

## 5 结 论

(1)碳酸盐胶结物具有多矿物类型、多期次和多种分布形式的特征。不同的碳酸盐矿物微观特征存在差异,其溶解—沉淀平衡受到温度、压力、孔隙水化学等的影响;碳酸盐胶结物可以在同生期—深成岩的各个阶段形成;碳酸盐胶结物分布模式多样,分布规模不一。

(2)碳酸盐胶结物的物质来源包括内源和外源,内源主要包括碳酸盐岩屑或生物碎屑的溶解、钙长石溶解、原生沉积流体、铝硅酸盐的水化作用等;碳酸盐胶结物的外部物质来源主要包括泥岩的成岩作用。

(3)碳酸盐胶结物可以由砂泥岩协同成岩作用、蒸发作用、生物碎屑溶解再沉淀作用、沉积速率控制作用、热对流作用、深部热流体作用等机制形成。在陆相碎屑岩储层中,砂泥岩协同成岩作用是形成碳酸盐胶结的最重要机制,但在海陆过渡相—海相地层中,除了砂泥岩协同成岩作用外,生物碎屑溶解沉淀作用、沉积速率控制作用也是重要的碳酸盐胶结物形成机制。不同成因机制下形成的碳酸盐胶结物的矿物类型及特征、控制因素及分布规律存在差异。

(4)碳酸盐胶结物成因研究要注意利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值判断物质来源存在不确定性,要重视层序地层和沉积环境在海陆过渡相—海相地层中对碳酸盐胶结的作用,要注意相同的矿物类型(如“铁白云石”)或分布(如“顶钙”)成因的多解性。

## 参 考 文 献

- [1] 张敏强,黄思静,吴志轩,等.东海盆地丽水凹陷古近系储层砂岩中碳酸盐胶结物及形成机制[J].成都理工大学学报(自然科学版),2007,34(3):259-266.
- [2] 王琪,郝乐伟,陈国俊,等.白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理[J].石油学报,2010,31(4):553-558,565.
- [3] WANG Jian, CAO Yingchang, LIU Keyu, et al. Pore fluid evolution, distribution and water-rock interactions of carbonate cements in red-bed sandstone reservoirs in the Dongying Depression, China[J]. Marine and petroleum geology, 2016, 72: 279-294.
- [4] YANG Tian, CAO Yingchang, FRIIS H, et al. Genesis and distribution pattern of carbonate cements in lacustrine deep-water gravity-flow sandstone reservoirs in the third member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag, Jiyang Depression, Eastern China[J]. Marine and petroleum geology, 2018, 92: 547-564.
- [5] DUTTON S P. Calcite cement in Permian deep-water sandstones, Delaware Basin, west Texas: origin, distribution, and effect on reservoir properties[J]. AAPG bulletin, 2008, 92(6): 765-787.
- [6] MA Benben, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Origin of carbonate cements with implications for petroleum reservoir in Eocene sandstones, northern Dongying depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Energy exploration & exploitation, 2016, 34(2): 199-216.
- [7] MORSE J W, ARVIDSON R S. The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals [J]. Earth-science reviews, 2002, 58(1/2): 51-84.
- [8] POKROVSKY O S, GOLUBEV S V, SCHOTT J, et al. Calcite, dolomite and magnesite dissolution kinetics in aqueous solutions at acid to circumneutral pH, 25 to 150 °C and 1 to 55 atm  $p\text{CO}_2$ : new constraints on  $\text{CO}_2$  sequestration in sedimentary basins[J]. Chemical geology, 2009, 265(1/2): 20-32.
- [9] KANTOROWICZ J D, BRYANT I D, DAWANS J M. Controls on the geometry and distribution of carbonate cements in Jurassic sandstones: Bridport Sands, southern England and Viking Group, Troll Field, Norway[J]. Geological Society London special publications, 1987, 36(1): 103-118.
- [10] 徐北煤,卢冰徐.硅质碎屑岩中碳酸盐胶结物及其对储层的控制作用的研究[J].沉积学报,1994,12(3):56-66.
- [11] MORAD S. Carbonate cement in sandstones: distribution patterns and geochemical evolution [M]// MORAD Sadoon carbonate cementation in sandstones. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., 1998, 26: 1-26.
- [12] 谭先锋,蒋威,吴康军,等.陆相碎屑岩中钙质胶结物沉淀机

- 制及油气储集意义:来自济阳拗陷孔店组和川西须家河组的对比研究[J].石油实验地质,2016,38(3):293-302.
- [13] 关平,张文涛,吴雪松,等.江汉盆地白垩系渔洋组砂岩的成岩作用及其热力学分析[J].岩石学报,2006,22(8):2144-2150.
- [14] 闫志为,张志卫.氯化物对方解石和白云石矿物溶解度的影响[J].水文地质工程地质,2009,36(1):113-118.
- [15] 蒋小琼,王恕一,范明,等.埋藏成岩环境碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验研究[J].石油实验地质,2008,30(6):643-646.
- [16] 王代富,罗静兰,陈淑慧,等.珠江口盆地白云凹陷深层砂岩储层中碳酸盐胶结作用及成因探讨[J].地质学报,2017,91(9):2079-2090.
- [17] MA Benben, CAO Yingchang, ERIKSSON K A, et al. Carbonate cementation patterns, potential mass transfer, and implications for reservoir heterogeneity in Eocene tight-oil sandstones, Dongying depression, Bohai Bay Basin, China: evidence from petrology, geochemistry, and numerical modeling [J]. AAPG bulletin, 2019, 103(12): 3035-3067.
- [18] 王行信,周书欣.泥岩成岩作用对砂岩储层胶结作用的影响[J].石油学报,1992,13(4):20-30.
- [19] CARVALHO M V F, DE ROS L F, GOMES N S. Carbonate cementation patterns and diagenetic reservoir facies in the Campos Basin cretaceous turbidites, offshore eastern Brazil [J]. Marine and petroleum geology, 1995, 12(7): 741-758.
- [20] MCBRIDE E F, MILLIKEN K L, CAVAZZA W, et al. Heterogeneous distribution of calcite cement at the outcrop scale in Tertiary sandstones, northern Apennines, Italy [J]. AAPG bulletin, 1995, 79(7): 1044-1062.
- [21] KETZER J M, MORAD S, EVANS R, et al. Distribution of diagenetic alterations in fluvial, deltaic, and shallow marine sandstones within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Mullaghmore Formation (Carboniferous), NW Ireland [J]. Journal of sedimentary research, 2002, 72(6): 760-774.
- [22] 钟大康,朱筱敏,张琴.不同埋深条件下砂泥岩互层中砂岩储层物性变化规律[J].地质学报,2004,78(6):863-871.
- [23] 孙海涛,钟大康,刘洛夫,等.沾化凹陷沙河街组砂岩透镜体表面与内部碳酸盐胶结作用的差异及其成因[J].石油学报,2010,31(2):246-252.
- [24] MORAD S, KETZER J M, DE ROS L F. Linking diagenesis to sequence stratigraphy: an integrated tool for understanding and predicting reservoir quality distribution [M]// MORAD S, KETZER J M, DE ROS L F. Linking diagenesis to sequence stratigraphy. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Inc., 2013: 1-36.
- [25] 张青青,刘可禹,衡立群,等.珠江口盆地番禺A油田珠江组“顶钙”发育特征、成因与分布模式[J].地球科学,2021,46(5):1783-1796.
- [26] DE SOUZA R S, DE ASSIS SILVA C M. Origin and timing of carbonate cementation of the Namorado sandstone (Cretaceous), Albacora Field, Brazil: implications for oil recovery [M]// MORAD S. Carbonate cementation in sandstones. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., 1998, 26: 309-325.
- [27] WORDEN R H, MATRAY J M. Carbonate cement in the Triassic Chaunoy Formation of the Paris Basin: distribution and effect on flow properties [M]// MORAD S. Carbonate cementation in sandstones. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., 1998, 26: 163-177.
- [28] HENDRY J P, TREWIN N H, FALLICK A E. Low-Mg calcite marine cement in Cretaceous turbidites: origin, spatial distribution and relationship to seawater chemistry [J]. Sedimentology, 1996, 43(5): 877-900.
- [29] WALDERHAUG O, BJRKUM P A. Calcite cement in shallow marine sandstones: growth mechanisms and geometry [M]// MORAD S. Carbonate cementation in sandstones. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., 1998, 26: 179-192.
- [30] EL-GHALI M A K, MANSURBEG H, MORAD S, et al. Distribution of diagenetic alterations in fluvial and paralic deposits within sequence stratigraphic framework: evidence from the Petrohan Terrigenous Group and the Svidol Formation, Lower Triassic, NW Bulgaria [J]. Sedimentary geology, 2006, 190(1): 299-321.
- [31] FRIEDMAN G M. 经成岩作用的储集层与油气的早期运移 [J]. 王殿凯译. 油气勘探译丛, 1983(2): 74.
- [32] 赵洪,罗晓容,肖中尧,等.塔里木盆地哈得逊油田东河砂岩隔夹层特征及其石油地质意义[J].天然气地球科学,2014,25(6):824-833.
- [33] 姜洪福,王梓媛,师永民,等.东河塘滨岸砂体蒸发泵吸作用与钙质隔夹层形成[J].北京大学学报(自然科学版),2015,51(5):857-862.
- [34] VINCENT B, WATERS J, WITKOWSKI F, et al. Diagenesis of Rotliegend sandstone reservoirs (offshore Netherlands): the origin and impact of dolomite cements [J]. Sedimentary geology, 2018, 373: 272-291.
- [35] TAYLOR K G, GAWTHORPE R L, CURTIS C D, et al. Carbonate cementation in a sequence-stratigraphic framework: Upper Cretaceous sandstones, Book Cliffs, Utah-Colo- rado [J]. Journal of sedimentary research, 2000, 70(2): 360-372.
- [36] MORAD S, AL-RAMADAN K, KETZER J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: a review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy [J]. AAPG bulletin, 2010, 94(8): 1267-1309.
- [37] 吴素娟,黄思静,孙治雷,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩中的白云石胶结物及形成机制[J].成都理工大学学报(自然科学版),2005,32(6):569-575.
- [38] 刘四兵,黄思静,沈忠民,等.砂岩中碳酸盐胶结物成岩流体演化和水岩作用模式:以川西孝泉—丰谷地区上三叠统须四段致密砂岩为例[J].中国科学:D辑 地球科学,2014,44(7):1403-1417.
- [39] 王生朗,任来义,王英,等.盐湖环境成岩作用特征及其对高孔隙带形成的影响[J].石油勘探与开发,2003,30(5):47-49.
- [40] 谭先锋,黄建红,李洁,等.深部埋藏条件下砂岩中碳酸盐胶结物的成因及储层改造:以济阳拗陷始新统孔店组为例[J].地质论评,2015,61(5):1107-1120.
- [41] IRWIN H, CURTIS C, COLEMAN M. Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments [J]. Nature, 1977, 269: 209-213.

- [42] WANG Jian, CAO Yingchang, LIU Keyu, et al. Mass transfer between mudstone-sandstone interbeds during diagenesis as revealed from the type and distribution of carbonate cements in the Eocene beach-bar sandstones, Bohai Bay Basin [J]. *Marine and petroleum geology*, 2019, 110: 21-34.
- [43] BOLES J R, FRANKS S G. Clay diagenesis in Wilcox sandstones of southwest Texas: implications of smectite diagenesis on sandstone cementation [J]. *Journal of sedimentary petrology*, 1979, 49(1): 55-70.
- [44] 孟凡晋,肖丽华,谢玉洪,等.莺歌海盆地黏土矿物异常转化及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2012, 30(3): 469-476.
- [45] XI Kelai, CAO Yingchang, ZHU Rukai, et al. Evidences of localized CO<sub>2</sub>-induced diagenesis in the Cretaceous Quantou Formation, southern Songliao Basin, China [J]. *International journal of greenhouse gas control*, 2016, 52: 155-174.
- [46] 庞江,罗静兰,马永坤,等.白云凹陷第三系储层中铁白云石的成因机理及与CO<sub>2</sub>活动的关系[J]. *地质学报*, 2019, 93(3): 724-737.
- [47] YANG Tian, CAO Yingchang, LIU Keyu, et al. Formation of zoned ankerite in gravity-flow sandstones in the Linnan Sag, Bohai Bay Basin, eastern China: evidence of episodic fluid flow revealed from in-situ trace elemental analysis [J]. *Marine and petroleum geology*, 2020, 113: 104-139.
- [48] WALDERHAUG O, BJØRKUM P A. Effect of meteoric water flow on calcite cementation in the Middle Jurassic Oseberg Formation, well 30/3-2, Veslefrikk Field, Norwegian North Sea [J]. *Marine and petroleum geology*, 1992, 9(3): 308-318.
- [49] DUTTON S P, WHITE C D, WILLIS B J, et al. Calcite cement distribution and its effect on fluid flow in a deltaic sandstone, Frontier Formation, Wyoming [J]. 2002, 86(12): 2007-2021.
- [50] DENNY A C, KOZDON R, KITAJIMA K, et al. Isotopically zoned carbonate cements in Early Paleozoic sandstones of the Illinois Basin:  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  records of burial and fluid flow [J]. *Sedimentary geology*, 2017, 361: 93-110.
- [51] THYNE G. A model for diagenetic mass transfer between adjacent sandstone and shale [J]. *Marine and petroleum geology*, 2001, 18(6): 743-755.
- [52] BJØRLYKKE K, JAHREN J. Open or closed geochemical systems during diagenesis in sedimentary basins: constraints on mass transfer during diagenesis and the prediction of porosity in sandstone and carbonate reservoirs [J]. *AAPG bulletin*, 2012, 96(12): 2193-2214.
- [53] CURTIS C D. Possible links between sandstone diagenesis and depth-related geochemical reactions occurring in enclosing mudstones [J]. *Journal of the Geological Society*, 1978, 135(1): 107-117.
- [54] 操应长,杨田,宋明水,等.陆相断陷湖盆低渗透碎屑岩储层特征及相对优质储层成因:以济阳坳陷东营凹陷古近系为例[J]. *石油学报*, 2018, 39(7): 727-743.
- [55] FRIEDMAN G M, SANDERS J E. Chapter 6 origin and occurrence of dolostones [J]. *Developments in sedimentology*. 1967, 9: 267-348.
- [56] HSU K J, SIEGENTHALER C. Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem [J]. *Sedimentology*, 1969, 12(1/2): 11-25.
- [57] 韩如冰,刘强,江同文,等.钙质隔夹层特征、成因及分布:以塔里木盆地哈得油田东河砂岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(4): 428-437.
- [58] MÜLLER D W, MCKENZIE J A, MUELLER P A. Abu Dhabi sabkha, Persian Gulf, revisited: application of strontium isotopes to test an early dolomitization model [J]. *Geology*, 1990, 18(7): 618-621.
- [59] 黄思静,佟宏鹏,刘丽红,等.川东北飞仙关组白云岩的主要类型、地球化学特征和白云化机制[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2363-2372.
- [60] 苏中堂,陈洪德,徐粉燕,等.鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2230-2238.
- [61] BJØRKUM P A, WALDERHAUG O. Isotopic composition of a calcite-cemented layer in the Lower Jurassic Bridport sands, southern England: implications for formation of laterally extensive calcite-cemented layers [J]. *Journal of sedimentary petrology*, 1993, 63(4): 678-682.
- [62] BRYANT L D, KANTOROWICZ J D, LOVE C F. The origin and recognition of laterally continuous carbonate-cemented horizons in the Upper Lias Sands of southern England [J]. *Marine and petroleum geology*, 1988, 5(2): 108-133.
- [63] WOOD J R, HEWETT T A. Reservoir diagenesis and convective fluid flow: part 1. concepts and principles [J]. *AAPG special volumes*, 1984, 59: 99-110.
- [64] 纪友亮,赵澄林,刘孟慧.东濮凹陷地层流体的热循环对流与成岩圈闭的形成[J]. *石油实验地质*, 1995, 17(1): 8-16.
- [65] 刘立,于均民,孙晓明,等.热对流成岩作用的基本特征与研究意义[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(5): 583-585.
- [66] 张以明,朱连儒,方少仙.低渗砂岩储层中自生矿物的成岩模式及其油气勘探意义:以冀中坳陷饶阳凹陷下第三系沙三段为例[J]. *石油勘探与开发*, 1993, 20(4): 106-114, 105.
- [67] 袁静,赵澄林.水介质的化学性质和流动方式对深部碎屑岩储层成岩作用的影响[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2000, 24(1): 60-63.
- [68] BJØRLYKKE K, MO A, PALM E. Modelling of thermal convection in sedimentary basins and its relevance to diagenetic reactions [J]. *Marine and petroleum geology*, 1988, 5(4): 338-351.
- [69] 侯中帅,周立宏,陈世悦,等.大港探区上古生界储层类型与控制因素[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5): 1021-1037.
- [70] MACHEL H G, LONNEE J. Hydrothermal dolomite: a product of poor definition and imagination [J]. *Sedimentary geology*, 2002, 152(3/4): 163-171.
- [71] 胡文瑛.盆地深部流体主要来源及判别标志研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(5): 817-826.
- [72] 解习农,李思田,董伟良,等.热流体活动示踪标志及其地质意义:以莺歌海盆地为例[J]. *地球科学*, 1999, 24(2): 3-5.
- [73] ZHU Dongya, JIN Zhijun, HU Wenxuan, et al. Effect of igneous activity on hydrocarbon source rocks in Jiyang sub-ba-

- sin, eastern China[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2007, 59(3/4): 309–320.
- [74] 聂逢君,姜美珠,李思田,等.砂岩对热流体作用的响应及识别标记:以珠江口盆地西部为例[J].地学前缘, 2005, 12(4): 581–591.
- [75] LONNÉE J, MACHEL H G. Pervasive dolomitization with subsequent hydrothermal alteration in the Clarke Lake gas field, Middle Devonian Slave Point Formation, British Columbia, Canada[J]. AAPG bulletin, 2006, 90(11): 1739–1761.
- [76] 王清斌,刘立,牛成民,等.渤中凹陷北部陡坡带热液活动及其对湖相碳酸盐岩储层的影响[J].地球科学, 2019, 44(8): 2751–2760.
- [77] TAYLOR K G, GAWTHORPE R L, FANNON-HOWELL S. Basin-scale diagenetic alteration of shoreface sandstones in the Upper Cretaceous Spring Canyon and Aberdeen Members, Blackhawk Formation, Book Cliffs, Utah[J]. Sedimentary geology, 2004, 172(1/2): 99–115.
- [78] SAMPLE J C, TORRES M E, FISHER A, et al. Geochemical constraints on the temperature and timing of carbonate formation and lithification in the Nankai Trough, NanTroSEIZE transect [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2017, 198: 92–114.
- [79] EL-GHALI M A K, MORAD S, MANSURBEG H, et al. Diagenetic alterations related to marine transgression and regression in fluvial and shallow marine sandstones of the Triassic Buntsandstein and Keuper sequence, the Paris Basin, France [J]. Marine and petroleum geology, 2009, 26(3): 289–309.
- [80] SMALLEY P C, STIJFHOOORN D E, RÅHEIM A, et al. The laser microprobe and its application to the study of C and O isotopes in calcite and aragonite [J]. Sedimentary geology, 1989, 65(3): 211–221.
- [81] XI Kelai, CAO Yingchang, LIN Miruo, et al. Applications of light stable isotopes (C, O, H) in the study of sandstone diagenesis: a review [J]. Acta geologica sinica (English edition), 2019, 93(1): 213–226.

编辑:黄革萍

## Research status of the genesis of carbonate cementation in clastic reservoirs

ZHANG Qingqing, LIU Keyu, LIU Taixun, SUN Runping, MENG Yang

**Abstract:** On the basis of a thorough review of the up-to-date relevant literatures, the characteristics, material sources, and genetic mechanisms of carbonate cements in clastic reservoirs are systematically examined and discussed; the distribution laws under different mechanisms are summarized; and several issues that should be paid attention to are emphasized. Carbonate cements in clastic reservoirs are characterized by multiple mineral types, multiple formation phases and heterogeneous distribution. The material sources of carbonate cements include both endogenous and exogenous sources. Carbonate cements in clastic reservoirs can be formed by the synergistic diagenesis of sandstones and mudstones, evaporation, bioclast dissolution and re-precipitation, sedimentation rate controlling effect, thermal convection, deep hydrothermal fluid intrusion and other mechanisms. In the continental clastic reservoirs, the synergistic diagenesis of sandstones and mudstones is one of the most important mechanisms for the formation of carbonate cementation, but in marine-transitional strata, bioclastic dissolution and re-precipitation and sedimentation rate controlling effect are also important mechanisms for the formation of carbonate cementation. The mineral types and characteristics, controlling factors and distribution laws of carbonate cements under different mechanisms can vary significantly. Given the current status in carbonate cementation in clastic reservoirs, it is emphasized that particular attention needs to be paid to the uncertainty of the material sources proxied by  $\delta^{13}\text{C}$  value, the effect of high-frequency sequence stratigraphy and sedimentary environments on carbonate cementation in the transitional depositional settings and marine facies, and the non-unique interpretation of the origin of the same mineral type (such as “ankerite”) or the same distribution (such as “top carbonate cementation layers”) when it comes to determine the genesis of carbonate cements.

**Key words:** Carbonate cementation; material source; genetic mechanism; distribution law; clastic reservoirs

**ZHANG Qingqing**, First author: PhD candidate, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology. Add: No. 66 Changjiang West Rd., Huangdao District, Qingdao, Shandong 266580, China.

**LIU Keyu**, Corresponding author: Professor, mainly engaged in quantitative simulation of sedimentation and hydrocarbon accumulation. Add: No. 66 Changjiang West Rd., Huangdao District, Qingdao, Shandong 266580, China.