

鲁西地区张夏组碳酸盐岩成岩系统^①

樊爱萍¹ 杨仁超¹ 韩作振¹ 崔明明¹ 蔡娜²

(1.山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室 山东科技大学地科学院 山东青岛 266590; 2.山东省地质科学实验研究院 济南 250013)

摘要 鲁西地区寒武系碳酸盐岩广泛发育,但针对该区碳酸盐岩成岩作用的研究较少。镜下鉴定显示研究区发育压实作用、胶结作用这两种破坏性成岩作用及溶解作用、压溶作用和白云石化作用等三种建设性成岩作用。新生变形作用对物性的影响可分两种情况,退变新生变形作用对改善岩石物性意义不大,进变新生变形作用有利于晶间孔的形成。结合流体包裹体分析,将研究区张夏组划分为海水、大气淡水、封存压实卤水、温压水4个连续演化的成岩系统,不同成岩系统中发育不同的成岩流体体系和成岩作用类型。海水成岩系统的特征为:在浅海海底成岩环境下,成岩温度低,流体包裹体为单相;成岩作用有压实、泥晶化作用、胶结作用(形成纤维状、共轴纤维状、共轴增生胶结物),海水和淡水过渡带鲕粒发生白云石化作用。在大气淡水系统:早成岩期的成岩体系为CaCl₂-H₂O、NaCl-H₂O、MgCl₂-H₂O和NaCl-MgCl₂-H₂O盐水体,且盐度较低,发育等轴粒状方解石胶结作用和淡水溶解作用;古表生期和表生期发育溶解作用。封存压实卤水成岩系统,成岩流体体系为NaCl-MgCl₂-MgSO₄和KCl-CaCl₂-H₂O体系,主要发育胶结作用和压溶作用。温压水系统中,成岩流体体系为CaCl₂-H₂O、NaCl-CaCl₂-6H₂O、NaCl-MgCl₂-MgSO₄、MgCl₂-H₂O和FeCl₂-H₂O,发育胶结作用、埋藏溶蚀、压溶作用(表现为粗缝合线)和进变新生变形作用。淡水成岩系统和温压水系统都有利于溶解作用的发育,但是淡水成岩系统中选择性的溶解作用造成的溶蚀孔隙多被后期胶结物充填,而温压水系统中的溶蚀作用可新增1%~5%次生孔隙;压溶作用形成的未被完全充填的粗缝合线和进变新生变形作用发育的晶间孔,均有利于改善岩石物性。

关键词 鲁西地区 寒武系 成岩体系 流体包裹体 碳酸盐岩

第一作者简介 樊爱萍 女 1978年出生 博士 副教授 储层地质学 E-mail: xiaofan781026@sina.com

中图分类号 P581 **文献标识码** A

与短暂的沉积作用过程相比,沉积期后的成岩作用过程漫长而复杂。沉积物一旦沉积埋藏就开始了成岩过程,因此沉积岩从微观到宏观组构无不存在成岩作用的烙印,成岩作用也成为当今沉积学及沉积盆地分析比较活跃的前沿研究领域之一^[1]。与碎屑岩相比,碳酸盐岩成岩过程中更易受生物、温度、压力和孔隙流体的影响,成岩变化更为复杂。成岩作用研究对于了解碳酸盐岩储集空间及沉积—层控矿床的形成机制都具有十分重要的意义^[1-4]。

鲁西地区寒武系碳酸盐岩出露广泛,近年来研究主要集中在地层学、古生物学和沉积学等方面,而有关碳酸盐岩的成岩作用、成岩环境和岩石孔隙成因机理方面的研究相对较少。本文以鲁西露头区寒武系张夏组碳酸盐岩成岩作用为研究对象,研究碳酸盐沉积物成岩过程中经历的压实、胶结、压溶、溶蚀等各种成岩作用类型,不仅可以分析孔隙成因及其演化历史,而且有助于古流体性质的恢复和沉积—成岩环境

的分析。

1 地质背景

研究区位于山东省西南部,属华北板块地质分区,西北侧以聊(城)—兰(考)断裂、齐(河)—广(饶)断裂为界,至广饶县南侧向南经青州市向东,经昌乐、潍坊北至昌邑南,安丘—莒县断裂相接;东南侧以安丘—莒县断裂为界,南部至山东与江苏、安徽省的省界(图1)。区内寒武系主要含有一套碎屑岩与碳酸盐岩混合相沉积序列,自下而上包括:李官组、朱砂洞组、馒头组、张夏组、崮山组及炒米店组。其中寒武系上寒武统张夏组出露连续,地层厚约150~170 m,岩性有鲕粒灰岩、泥晶灰岩、生屑灰岩及凝块灰岩,其中鲕粒灰岩最为发育(图2),其总体上为一套以鲕滩为主的碳酸盐台地沉积序列^[5],局部发育局限海(图3)^[6-7]。可划分出开阔台地、局限台地和潮坪等沉积相,并可进一步划分滩间海、浅滩和潟湖等微相类型,

^①国家自然科学基金(批准号:40972043)、教育部科学技术研究重点项目(编号:211097)、山东省中青年科学家基金(编号:BS2009HZ020, 2010BSE06022)、山东省高校科学计划项目(编号:G08LD01, J09LE04)与山东科技大学科研创新团队计划(编号:2010KYTD103)联合资助
收稿日期:2013-12-23;收修改稿日期:2014-06-09

其中浅滩沉积受波浪和潮汐作用共同控制,水动力条件强,以鲕粒灰岩和生屑灰岩为主,灰泥组分少,为有利储层发育的相带。

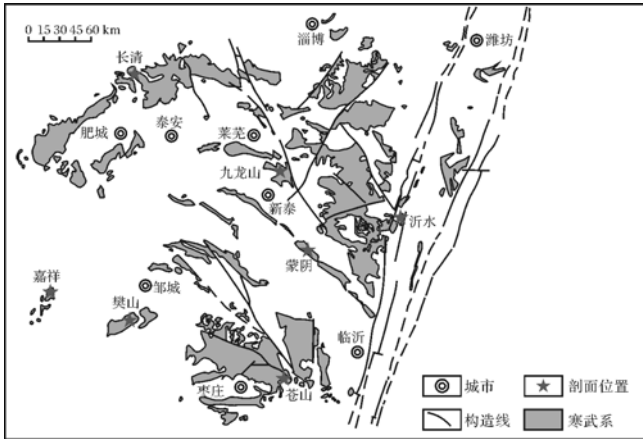


图1 研究区剖面位置图
Fig.1 Section location in the study area

受加里东运动影响,鲁西地区缺失晚奥陶世—泥盆纪沉积^[8],晚石炭世以后,张夏组又进入埋藏期,中生代以后,由于褶皱、断裂构造运动的影响^[9],该地层被抬升至地表,进入表生成岩环境。受中生代构造体制由早期的挤压环境向中晚期的拉张环境转化,鲁西地区形成了隆起与拗陷相间的构造格局^[8],除了沂水马站剖面位于沂水裂谷、嘉祥剖面位于济宁拗陷之外,长清、莱芜九龙山、蒙阴、邹城樊山、苍山等其余剖面均位于鲁中隆起区。

2 成岩作用类型

2.1 压实和压溶作用

鲁西地区寒武系张夏组碳酸盐岩压实作用一般较强,总体表现为颗粒定向排列、部分破裂和变形以及颗粒间的接触关系为线状接触或凹凸接触(图版 I-a),但在胶结作用强烈的部位压实作用表现不太明显。

随着埋藏加深,压溶作用增强,缝合线大量出现。该区缝合线按形态可分为两类,第一类是细缝合线,线内充填少量黑色不溶有机质或泥质等充填物,有些缝合线可被后期发育裂缝错断或被晚期胶结物错断(图版 I-b);第二类是粗缝合线,此类缝合线连续性好,缝合线切穿早期形成的颗粒和胶结物,没有间断,内部可含大量充填物,有时可见缝内白云石化,还可见大量残留孔隙(图版 I-c)。压溶作用导致颗粒和基质的溶解,形成缝合线^[10-13];当缝合线未被完全充

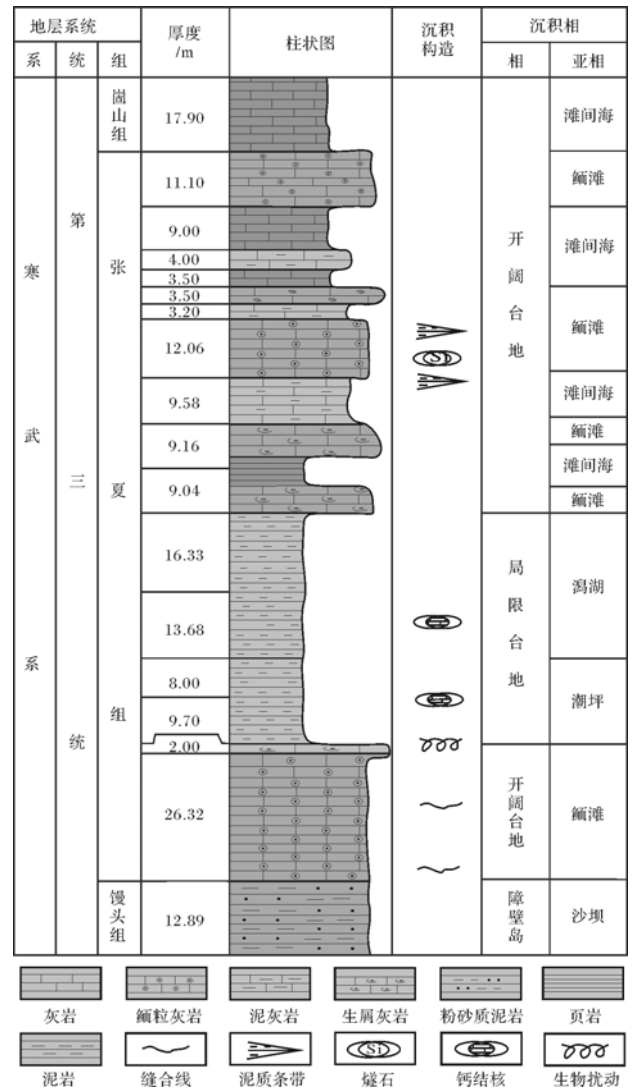


图2 鲁西苍山地区张夏组综合柱状图
Fig.2 Synthetical histogram of Zhangxia Formation in the western Shandong province

填时,可以改善储层物性,而成为一种建设性成岩作用。

2.2 新生变形作用

本区新生变形作用较为发育,可使晶体变大,也可使其变小,包括进变新生变形作用和退变新生变形作用。

2.2.1 退变新生变形作用

本区主要为浅海低能环境,在此环境下菌藻类等微生物围绕在生屑、鲕粒等颗粒边缘挖洞、钻孔,这些孔洞随后被泥晶物质充填,形成泥晶套(图版 I-d)。另外一种是整个颗粒内外均被泥晶化,外缘泥晶化强烈,内缘泥晶化弱一些,内部结构可见,有的强烈的内部结构也不可可见,完全被泥晶充填,可见菌丝体残余

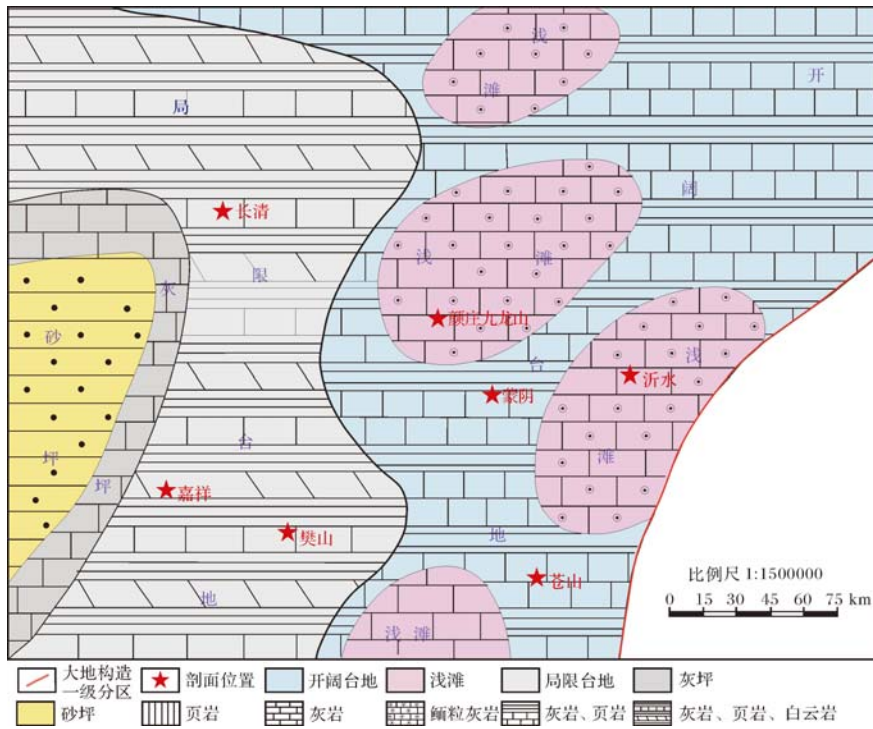


图 3 鲁西张夏组岩相古地理图

Fig.3 Lithofacies paleogeographic map of the Zhangxia Formation in the western Shandong province

物(图版 I -e)。总体而言,微生物的泥晶化作用常存在于安静的海相潜水带内,在这种环境下,很少有沉积物或孔隙流体的活动。

2.2.2 进变新生变形作用

进变新生变形作用在本区不同的成岩期均有发育,早期发育的只发生在颗粒中,表现为文石质的生屑以及鲕粒被钙化,胶结物中未见(图版 I -f)。这种早期的进变新生作用往往是由于原始沉淀的文石和高镁方解石矿物稳定性差^[14],成岩过程中向低镁方解石转化。

晚期进变新生变形作用常表现为早期形成的泥晶晶体增大,沉积的灰泥颗粒转变为微亮晶,但依然很污浊(图版 I -g),出现在粒间孔隙和粒内孔隙中,是属于成岩作用加强,较深埋藏环境下的产物。

2.3 溶解作用

2.3.1 大气淡水选择性溶解作用

鲁西地区张夏组沉积于开阔海浅滩环境,由于海平面波动,常使滩相沉积暴露,受到大气淡水淋滤而发生溶蚀。该期溶蚀作用具选择性的特点,表现为鲕粒及其他颗粒的溶蚀,往往形成粒内溶孔,由于此期溶解作用发育较早,形成的孔隙大多被后期嵌晶状胶结物充填(图版 I -h)。

2.3.2 埋藏期非选择性溶解作用:

埋藏环境下为非选择性溶蚀,颗粒和胶结物均发生溶蚀,往往在重结晶的鲕粒内或生屑内溶蚀,形成粒内溶孔。这些溶孔的孔径一般较小,0.05~0.3 mm 之间(图版 I -i),局部溶解作用较强的地方常跨越几个颗粒、晶体。这些溶孔部分被其后的泥质及沥青质充填或半充填,堵塞孔隙。较深埋藏条件下溶解作用还可沿着缝合线两侧发生溶解,形成缝合线内伴生溶孔(图版 I -c)。

2.4 胶结作用

2.4.1 纤维状、叶片状—棱柱状和埋藏期粗粒嵌晶状方解石

纤维状方解石胶结物在本区有两种,一种为共轴纤维状方解石,颗粒较为粗大,富含包裹体,常呈云雾状,波状消光,一般 0.2~0.5 mm,通常垂直底质生长,这种胶结物在海水潜流带发育(图版 I -j)。第二种纤维状方解石有世代性,第一期往往表现为针状胶结物或纤维状方解石胶结物,该区发育的有等厚环边的,颗粒较小,晶体明显正延长,形成等厚带壳状,其中厚度约 0.05~0.1 mm,晶体细密,反映了海水潜流带的特征,局部发育不是等厚环边的,可见纤维状方解石呈悬垂状,反映了局部的海水渗流环境;第二期

为叶片状—棱柱状方解石,晶体不等大,往往沿着它们的延长方向宽度增加,显得较宽一些,顶端则像马牙,长度约为0.05~0.3 mm,这种胶结物很可能是在原海水胶结物的基础上蚀变而来的^[15](图版 I-k, l);三期表现为埋藏期粗粒嵌晶状方解石,晶体间呈镶嵌接触,贴面角较平直,大小为0.5~1 mm,有向中心增大的趋势(图版 I-m, n、图4)。

2.4.2 共轴增生方解石

共轴增生方解石在本区鲕粒灰岩中,且鲕粒核心为棘皮类生物发育,围绕鲕粒形成含有较多细小的气、液包裹体、污浊的呈嵌晶状的增生胶结物(图版 I-o)。在共轴增生方解石发育的地方,鲕粒没有压实变形现象,表明共轴增生方解石生长是在压实作用之前,是海底成岩环境的产物。

2.4.3 大气淡水—浅埋阶段的等轴粒状方解石

本区发育的大气淡水—浅埋阶段的方解石不具有世代性,呈等轴粒状且大小均匀,粒径0.1 mm,充填颗粒灰岩中的粒间孔隙。该区沉积环境整体为开阔台地鲕滩相,随着海平面的波动,沉积物常暴露出水面,经大气淡水渗入发生溶解,同时 CaCO_3 过饱和溶液向下渗透产生粒状胶结物,充填粒间剩余孔隙和之前形成的溶蚀孔隙^[16]。

胶结物是表现碳酸盐岩成岩历史的重要记录,薄片研究在识别成岩环境和确定碳酸盐岩的共生序列是极为重要的,要成功恢复成岩历史,很大程度上取决于胶结物原始晶形的认识^[17]。本区胶结物类型多样,且不同的胶结物成岩环境也有所差别。在鲁西地区张夏组碳酸盐岩中发育的3种主要胶结作用中,共轴纤维状方解石和共轴增生状方解石的出现标志其成岩环境为海水环境,研究区共轴增生状方解石中含

大量细小云雾状包裹体,常在海水渗流带和潜流带形成,排除了埋藏成岩环境^[14],发育三期胶结物的第一期往往表现为针状胶结物或纤维状方解石,反映了其海水成岩环境的特点;第二期为叶片状—棱柱状方解石和第三期粗粒嵌晶状方解石,反映其经历的埋藏环境。等轴粒状方解石的出现则排除海底成岩环境的可能,其成岩环境为大气淡水环境,并且为大气淡水潜流带的产物。胶结物特征表明了该区成岩环境较为复杂,经历了海水成岩环境、淡水成岩环境和埋藏成岩环境。

2.5 白云石化作用

张夏组多为鲕粒灰岩的选择性白云石化作用,只有部分鲕粒白云石化,胶结物未见白云石化,反映了白云石化作用较早的特点(图版 I-p)。白云石呈自形—半自形,菱面体,细晶结构。晶粒表面常见亮边雾心结构,部分晶体发育2~3个环带,阴极发光呈现褐色和橙色,雾心亮边常以暗橙色为中心,向外依次为橙红—褐色—浅橙色,界线较平直,这种构造主要反映成岩孔隙流体随成岩环境及与淡水混合程度的变化而变化(图版 I-q)。

白云石化作用的强度影响碳酸盐岩的孔隙度,白云石化作用使得岩石的晶粒增大,岩性疏松,可形成大量晶间孔,孔隙度和渗透率增大,不仅改善了储集性能,并为以后的溶蚀作用创造了条件(图版 I-r)。

3 流体包裹体特征与古流体演化

本次共采集60件颗粒灰岩样品进行流体包裹体研究,先进行流体包裹体岩相学观察,然后选择胶结物中有代表性的流体包裹体进行显微测温实验。流体包裹体显微测温所用仪器为英国Linkam生产的

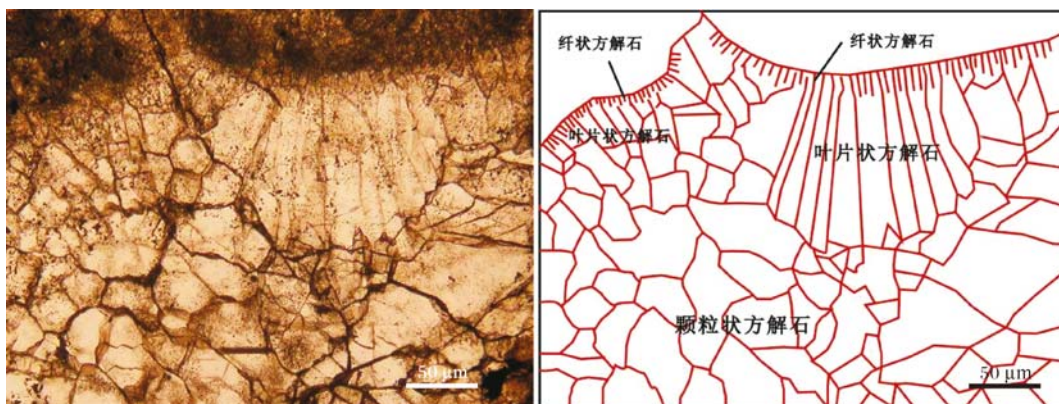


图4 嘉祥微山剖面张夏组灰岩不同世代胶结物

A. 镜下照片,单偏光10×20; B. 照片A的素描图

Fig.4 Different generation cements in limestone of the Zhangxia Formation in the Weishan profile

THMSG-600型显微冷热台(-194℃~600℃)。温度在0℃以下时,测试精度为±0.1℃,温度在0℃~300℃时,测试精度为±0℃~1℃。冷冻数据和均一温度数据精度分别为±0.1℃和±1℃。

3.1 流体包裹体岩相学特征

对于沉积岩中的包裹体,首先要进行岩矿学和成岩作用的仔细研究,在此基础上确定出包裹体的先后序次,而不能本末倒置,先测定温度和盐度等再反演包裹体期次,这是沉积岩包裹体期次研究中值得注意的前提条件和关键问题^[18]。故应先鉴别研究区张夏组灰岩中胶结物的先后序次,进而测定流体包裹体温度和盐度。通过显微镜下观察发现,针状、纤维状方解石胶结物中的流体包裹体普遍较小,约1~5 μm,而且包裹体数量少,类型为单相纯液体包裹体,两相流体包裹体和有机包裹体不发育。大气淡水—浅埋阶段的等轴粒状方解石胶结物中流体包裹体数量也较少,只发育盐水包裹体,无色透明,约5~10 μm,气液比5%~10%;叶片—棱柱状方解石胶结物中的流体包裹体数量最多,面状分布,发育两相盐水包裹体和有机包裹体,其中盐水包裹体颜色浅,约5~15 μm,长方形和菱面体居多,气液比为10%~30%,烃类包裹体颜色深,个体大,15~30 μm,气液比变化大,从10%~50%不等(图版II-a,b);嵌晶状方解石胶结物中的流体包裹体数量有所下降,串珠状排列,盐水包裹体和烃类包裹体也有发育,(图版II-c~h)。盐水包裹体有椭圆形、长条形和不规则等形状,颜色浅,约5~10 μm,气液比5%~15%,烃类包裹体颜色深,个体大,不规则状,15~30 μm,气液比变化大,从10%~50%。

3.2 流体包裹体显微测温结果

均一温度、初熔温度的测试是在前期所进行的包裹体岩相学观察的基础上进行的,对不同期次的盐水包裹体分别用均一法、冷冻法测出其均一温度、初熔

温度。对不同阶段样品进行详细流体包裹体显微测温分析发现,流体包裹体均一温度数据可全部获得,由于包裹体细小,测试起来困难较大,仅部分获得初熔温度,测温结果列于表1、表2。

通过均一温度测定,发现均一温度分布范围较广,分布在32.8℃~130℃之间,胶结充填具有多期性,均一温度也表现为不同的区间,大气淡水—浅埋阶段的等轴粒状方解石胶结物中包裹体的温度分布在32.8℃~60℃之间,平均值44.4℃,此种胶结物比较特殊,根据初熔温度,划分出CaCl₂-H₂O、NaCl-H₂O、MgCl₂-H₂O和NaCl-MgCl₂-H₂O盐水体系,其中对NaCl-H₂O又进行了冰点温度的测试,盐度7.4%~9.6%,属低盐度体系;叶片—棱柱状方解石胶结物中包裹体温度范围为47.4℃~95.6℃,平均为64.6℃(表1),发育NaCl-MgCl₂-MgSO₄卤水体系、KCl-CaCl₂-H₂O体系;嵌晶状方解石胶结物中流体包裹体温度范围为60.3℃~130℃,平均84.5℃,发育CaCl₂-H₂O、NaCl-CaCl₂-6H₂O、NaCl-MgCl₂-MgSO₄、MgCl₂-H₂O和FeCl₂-H₂O体系。另外,还有部分包裹体的初熔温度介于各流体体系之间,不能严格的划分出其所属体系,对这类包裹体流体的归属问题仍待解决。

流体包裹体特征反映出张夏组碳酸盐岩多期次的成岩历史,总体具有成岩强度加大、流体包裹体均一温度逐渐升高和成岩体系改变的演化特点,可为成岩环境演化提供信息。如早期海底成岩环境中发育的针状、纤维状方解石胶结物形成温度低,流体包裹体为单相流体包裹体,主要在同生成岩阶段形成;大气淡水环境中发育的等轴粒状方解石胶结物中,盐水包裹体具有较低的温度和盐度,主要在同生—早成岩阶段形成;叶片—棱柱状胶结物样品发育大量气液两相盐水包裹体,均一温度较高,盐水体系也发生变化,为早成岩阶段,浅—中埋藏成岩环境的产物;嵌晶状方解石胶结物样品流体包裹体均一温度达到最高值,

表1 张夏组碳酸盐岩流体包裹体均一温度数据

Table 1 Measured homogenization temperature of fluid inclusions in Zhangxia Formation

剖面	样品号	寄主矿物	包裹体类型	大小/μm	气液比/%	均一温度/℃
苍山	YZ2-B1	嵌晶状方解石	盐水包裹体	5~10	5~15	70.8~130
苍山	YZ4-B1	等粒状方解石	盐水包裹体	5~10	5~10	32.8~60
苍山	YZ8-B1	嵌晶状方解石	盐水包裹体	10~15	5~15	67~130
苍山	YZ33-B1	嵌晶状方解石	盐水包裹体	10~15	5~15	60.3~101.2
微山	MLS12-B5	叶片—棱柱状胶结物	盐水包裹体	5~15	10~15	73.2~95.6
微山	MLS2-B1	叶片—棱柱状胶结物	盐水包裹体	5~10	15~30	47.4~80.4
嘉祥	THSX3-B1	叶片—棱柱状胶结物	盐水包裹体	5~10	10~15	50~78.9
嘉祥	THSX4-B2	叶片—棱柱状胶结物	盐水包裹体	5~10	10~15	52.2~89.3

表2 张夏组碳酸盐岩流体包裹体初熔温度数据与体系划分

Table 2 Eutectic temperature and system partition of fluid inclusions in carbonate rocks in Zhangxia Formation

样品号	大小/ μm	颜色	气液比/%	寄主矿物	初熔温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/%	体系
YZ2-B1	10	无	5	嵌晶状方解石	-49	1.06	$\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
YZ2-B1	10	无	5	嵌晶状方解石	-52	1.06	$\text{NaCl-CaCl}_2\text{-6H}_2\text{O}$
YZ4-B1	10	无	10	等粒状方解石	-45.9	20.97	$\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
YZ4-B1	10	无	10	等粒状方解石	-50	19.53	$\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
YZ4-B1	10	无	10	等粒状方解石	-35	11.81	$\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
YZ4-B1	10	粉红	5	等粒状方解石	-33.5	14.25	$\text{MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
YZ4-B1	10	粉红	5	等粒状方解石	-19.8	15.47	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$
YZ4-B1	10	粉红	5	等粒状方解石	-19.8	9.47	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$
YZ4-B1	15	无	10	等粒状方解石	-48.7	12.85	$\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
YZ8-B1	15	无	10	嵌晶状方解石	-68	16.53	$\text{NaCl-MgCl}_2\text{-MgSO}_4$
YZ8-B1	15	无	5	嵌晶状方解石	-52	11.93	$\text{NaCl-CaCl}_2\text{-6H}_2\text{O}$
YZ8-B1	15	无	10	嵌晶状方解石	-33.7	22.91	$\text{MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
YZ8-B1	15	无	5	嵌晶状方解石	-51.5	22.38	$\text{NaCl-CaCl}_2\text{-6H}_2\text{O}$
YZ33-B1	10	无	15	嵌晶状方解石	-50.1	11.46	$\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
YZ33-B1	15	无	15	嵌晶状方解石	-49.1	10.49	$\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
YZ33-B1	15	无	15	嵌晶状方解石	-52	8.28	$\text{NaCl-CaCl}_2\text{-6H}_2\text{O}$
YZ33-B1	15	无	15	嵌晶状方解石	-38	12.96	$\text{FeCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
MLS12-B5	15	无	15	叶片—棱柱状胶结物	-70.6	14.04	$\text{NaCl-MgCl}_2\text{-MgSO}_4$
THSX3-B1	16	无	15	叶片—棱柱状胶结物	-56.1	13.18	$\text{KCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
THSX4-B2	10	无	15	叶片—棱柱状胶结物	-70.8	14.25	$\text{NaCl-MgCl}_2\text{-MgSO}_4$
THSX4-B2	20	无	15	叶片—棱柱状胶结物	-70.6	13.4	$\text{NaCl-MgCl}_2\text{-MgSO}_4$
THSX4-B2	11	无	10	叶片—棱柱状胶结物	-70.6	16.34	$\text{NaCl-MgCl}_2\text{-MgSO}_4$

成岩流体化学性质也发生了明显变化,划分为中成岩阶段,中—深埋藏成岩环境。

4 成岩环境演化与孔隙度评价

碳酸盐岩成岩环境演化是一个复杂的物理化学变化过程,尤其是发生在成岩阶段的化学变化常对岩石孔隙结构和矿物组成的变化产生重要的影响,而这种变化通常是由孔隙流体性质的变化所引起的。基于成岩作用与流体之间存在的密切关系,以流体性质和活动特征为依据进行成岩系统的划分有其恰当之处^[1]。将上述各成岩阶段成岩作用特征与成岩流体性质结合起来,按“水文体制”与相对应的地质作用过程和相应的水化学与成岩反应及其组合特征^[1],将研究区张夏组碳酸盐岩的成岩演化划分为海水、大气淡水、封存压实卤水、温压水4个系统,并进行了成岩环境的恢复(图5)。

张夏组沉积时期研究区为开阔海浅滩高能环境,沉积主要由鲕粒和生物碎屑颗粒等组成亮晶颗粒灰岩。浅滩环境颗粒沉积下来以后,成岩流体具有低温海水性质,在海水潜流带接近沉积物—海水接触处,主要发生的是菌藻类对颗粒的钻孔作用,颗粒发生泥晶化,可形成厚度不同的泥晶套,甚至颗粒完全泥晶

化。此时,还可形成纤维状、针状方解石胶结物,使得原生孔隙减少。其中纤维状和针状方解石中的流体包裹体多为单相流体包裹体,反映了其温度较低的特点。由于此时缺乏持续的淡水淋滤作用,泥晶套中鲕粒没有发生溶解作用,形成负鲕,泥晶化作用对岩石物性并没有明显的改善作用。在此带发育棘皮动物的颗粒,形成共轴增生方解石胶结物,有底质存在的地方往往发育共轴纤维状方解石胶结物。

之后水体由深变浅,受大气淡水与海水混合作用,文石、高镁方解石沉淀组成的鲕粒在此环境下,容易发生选择性白云石化。在此混合带,方解石不饱和,白云石过饱和,镁离子来自于海水,也可以来源于菌藻类、棘皮类生物的溶解,选择性白云石化往往造成鲕粒同心层被破坏。白云石晶体交代方解石,表现出“亮边雾心”的特点,白云石半自形—自形,少量泥质残余,白云石化有利于改善岩石物性。按分子对分子交代理论来说,当石灰岩被白云岩完全交代,将会增加12.5%的孔隙度;另一方面,由于交代的白云石较方解石具有更加粗大和自形的晶体,从而可提高岩石的有效孔隙度和渗透率^[19-22]。因而白云石化有利于孔隙流体的流通,为埋藏期溶解作用的进行奠定了基础。

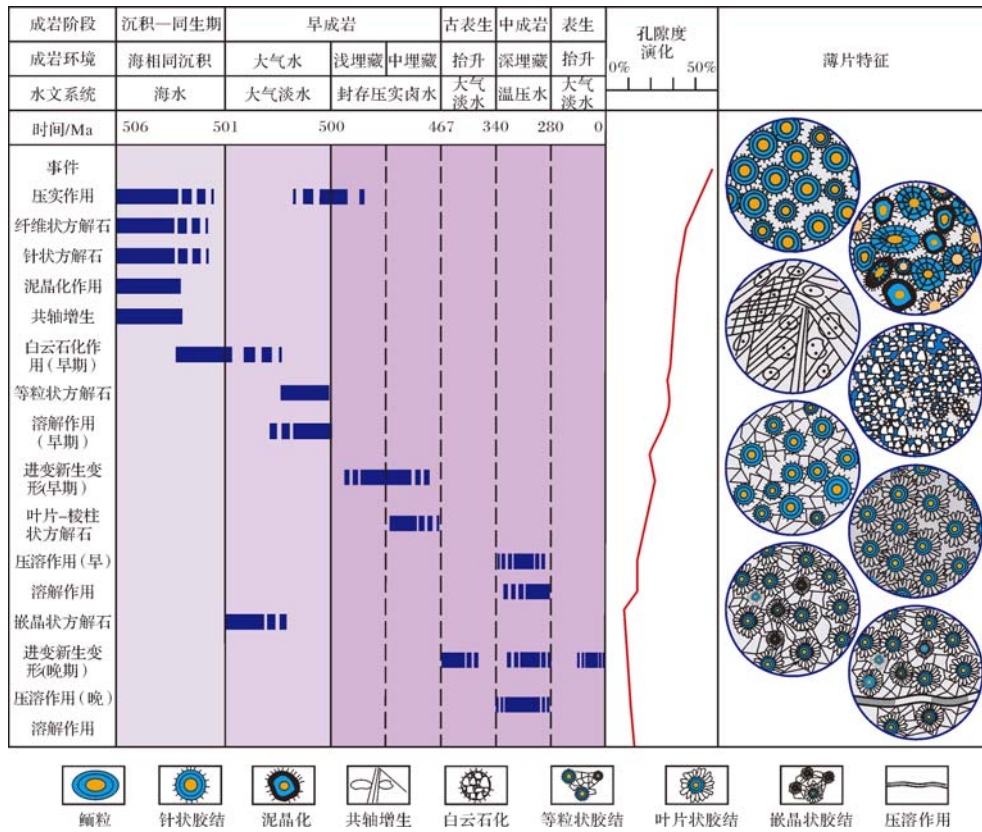


图 5 鲁西地区张夏组碳酸盐岩成岩序列与孔隙演化图

Fig.5 Diagenetic sequence and porosity variation of carbonate rocks in Zhangxia Formation in the western Shandong province

在此之后浅滩间歇暴露,局部高地处于大气潜流带,成岩流体具有淡化的大气水成岩流体性质,水体中的 CO₂造成水体呈弱酸性,文石和高镁方解石的生物骨骼以及文石质的鲕粒和早期胶结物溶解,形成特征的铸模孔隙和粒间孔隙;随后发育胶结作用,鲕粒的铸模孔被亮晶方解石充填,形成单晶鲕或多晶鲕,在此大气潜流带内还发育等粒状方解石胶结物,其流体包裹体中显微测温工作揭示成岩流体属 CaCl₂-H₂O、NaCl-H₂O、MgCl₂-H₂O 和 NaCl-MgCl₂-H₂O 盐水体体系,且属低盐度体系,说明此时流体对前期海水有一定的继承性,但浓度较低,又反映了大气淡水对海水的改造作用。

后来大规模海侵开始,进入海底成岩环境,之后沉积颗粒被薄层沉积物覆盖,不再受到底层水的影响,进入浅—中埋藏环境,成岩作用主要发生在封存压实卤水成岩系统中,成岩温度平均 64.6℃,成岩体系为 NaCl-MgCl₂-MgSO₄和 KCl-CaCl₂-H₂O 体系;SO₄²⁻的出现说明成岩环境具有还原性,成岩流体具有浓缩海水的性质和逐渐增温的演化趋势,导致了物质重新分派组合,产生新的平衡。这一时期发育叶片—棱柱

状方解石胶结物,同时压溶作用凸现,形成细缝合线;还有文石转变为低镁方解石,该时期各类型成岩作用以破坏岩石物性为主。中奥陶世末期,华北地区整体抬升,张夏组进入大气淡水成岩系统,溶蚀作用发育。

晚石炭世以后,随着早古生代地层的覆盖,埋深持续增加,成岩作用主要发生在温压水成岩系统中,成岩平均温度约为 84.5℃,成岩体系为 CaCl₂-H₂O、NaCl-CaCl₂-6H₂O、NaCl-MgCl₂-MgSO₄、MgCl₂-H₂O 和 FeCl₂-H₂O,流体体系中有 Fe²⁺,代表了成岩环境更为封闭,且成岩环境的还原性增强,可能是从流体中有机质裂解并逸离出来的具有还原性的烃类气体所致。压溶持续进行,形成切穿颗粒和胶结物的粗缝合线;胶结物表现为晚期嵌晶状方解石胶结物,晚期进变新生变形作用常表现为早期形成的泥晶晶体增大,受有机质演化影响,这一阶段有机酸排出,发生埋藏期非选择性溶解作用,因而压溶作用、胶结作用和溶解作用成为本阶段的主旋律。压溶作用中会保存有机质和少量铁质矿物堵塞压溶缝,未堵塞的地方往往保留有孔隙,埋藏溶解作用可形成粒间孔隙,压溶和溶解作用有利于改善岩石物性。这一阶段的进变新生作

用也有利于晶间孔的发育,四个系统常重叠进行,说明了流体演化的连续性。

中生代早期受华北板块与扬子板块碰撞挤压构造体制的制约,研究区整体隆升,大气淡水下渗,为典型的大气水成岩系统,发生溶蚀作用。至中生代中晚期,太平洋板块向欧亚板块俯冲,构造体制由挤压向伸展环境转化,中生代伸展作用形成隆起和盆地相间分布的构造格局^[8],不同构造单元的碳酸盐岩成岩作用演化也产生了一定的分异。沂水马站剖面夹持与郯庐断裂带的 2 条主干断裂之间,构造裂缝发育,晚期方解石脉体极其发育,溶蚀作用强烈;嘉祥剖面位于济宁坳陷,晚期的溶蚀作用表现不明显;位于鲁中隆起区的长清、莱芜九龙山、蒙阴、邹城樊山、苍山等剖面溶蚀作用表现强烈,但裂缝及次生方解石脉体较少发育。

5 主要认识

(1) 鲁西地区张夏组碳酸盐岩经历了 6 种类型的成岩作用;破坏性成岩作用和建设性成岩作用共存,其中建设性成岩作用包括溶解作用、压溶作用和白云石化作用;破坏性成岩作用包括压实作用和胶结作用;新生变形作用对灰岩物性的影响可分为两种情况,退变新生变形作用对改善岩石物性意义不大,进变新生变形作用有利于晶间孔的形成。

(2) 研究区张夏组碳酸盐岩的成岩系统划分为海水、大气淡水、封存压实卤水、温压水 4 个系统。海水成岩系统中,研究区张夏组在浅海海底成岩环境下,成岩阶段属于同生阶段,成岩作用有压实作用、泥晶化作用和胶结作用,胶结作用表现为纤维状、共轴纤维状、共轴增生胶结物充填原生孔隙,对储层发育不利。其后,混合水成岩环境下,鲕粒白云石化作用有利于粒间孔的发育。在大气淡水成岩系统中,早成岩期,发育胶结作用和溶解作用,胶结物主要表现为等轴粒状方解石充填剩余孔隙;古表生期和表生期均发育溶解作用,但早成岩期和古表生期的溶蚀孔隙多被后期胶结物充填,降低孔隙度。封存压实卤水成岩系统中主要发育胶结作用和压溶作用,胶结物为叶片—棱柱状,堵塞孔隙,致使岩石物性变差,压溶作用表现为细缝合线,改善岩石物性意义不大。在温压水系统中发育胶结作用、溶解作用、压溶作用(表现为粗缝合线)和进变新生变形作用,这一时期的溶解作用,可新增 1%~5% 次生孔隙,以及压溶作用形成的未被完全充填的粗缝合线和进变新生变形作用发育

的晶间孔,都有利于改善岩石物性。

参考文献 (References)

- 1 李忠,韩登林,寿建峰. 沉积盆地成岩作用系统及其时空属性[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2151-2164. [Li Zhong, Han Denglin, Shou Jianfeng. Diagenesis systems and their spatio-temporal attribute in sedimentary basins [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2151-2164.]
- 2 Mekezhik V A, Roberts D, Fallick A E, et al. Geochemical preservation potential of high-grade calcite marble versus dolomite marble: implication for isotope chemostratigraphy [J]. Chemical Geology, 2005, 216(3/4): 203-224.
- 3 Lonnee 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.
- 4 黄思静,王春梅,黄培培,等. 碳酸盐成岩作用的研究前沿和值得思考的问题[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2008, 35(1): 1-10. [Huang Sijing, Wang Chunmei, Huang Peipei, et al. Scientific research frontiers and considerable questions of carbonate diagenesis [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2008, 35(1): 1-10.]
- 5 Meng Xianghua, Ge Ming, Tucker M E. Sequence stratigraphy, sea-level changes and depositional systems in the Cambro-Ordovician of the North China carbonate platform [J]. Sedimentary Geology, 1997, 114(1/2/3/4): 189-222.
- 6 Woo J, Chough S K, Han Z. Chambers of epiphyton thalli in microbial buildups, Zhangxia Formation (Middle Cambrian), Shandong province, China [J]. Palaios, 2008, 23(1): 55-64.
- 7 韩作振,陈吉涛,张晓蕾,等. 鲁西寒武系第三统张夏组附枝菌与附枝菌微生物灰岩特征研究[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1097-1103. [Han Zuozhen, Chen Jitao, Zhang Xiaolei, et al. Characteristics of epiphyton and epiphyton microbialites in the Zhangxia Formation (Third Series of Cambrian), Shandong province [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8): 1097-1103.]
- 8 宋明春,徐军祥,王沛成,等. 山东省大地构造格局和地质构造演化 [M]. 北京:地质出版社, 2009: 210. [Song Chunming, Xu Junxiang, Wang Peicheng, et al. Tectonic Framework and Tectonic Evolution of the Shandong Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 210.]
- 9 张云峰,李忠,王清晨,等. 鲁西地区奥陶系碳酸盐岩成岩作用及其对储集性的控制作用[J]. 地质科学, 2005, 40(2): 207-219. [Zhang Yunfeng, Li Zhong, Wang Qingchen, et al. Diagenesis and its role on the reservoir of Ordovician carbonate rocks in the west Shandong rise [J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(2): 207-219.]
- 10 张博全,关振良,潘琳. 鄂尔多斯盆地碳酸盐岩的压实作用[J]. 地球科学, 1995, 20(3): 299-305. [Zhang Boquan, Guan Zhenliang, Pan Lin. Compaction of carbonate rocks in Ordos Basin [J]. Earth Science, 1995, 20(3): 299-305.]
- 11 Taghavi A A, Mork A, Emadi M A. Sequence stratigraphically con-

- trolled diagenesis governs reservoir quality in the carbonate Dehluran Field, Southwest Iran[J]. *Petroleum Geoscience*, 2006, 12(2): 115-126.
- 12 艾合买提江·阿不都热和曼,钟建华,李阳,等.塔河油田奥陶系缝合线特征及石油地质意义[J].*中国石油大学学报:自然科学版*,2010,34(1):7-11.[Ahmatjan Abdurahman, Zhong Jianhua, Li Yang, et al. Stylolite features and petroleum geology significance of the Ordovician in Tahe oilfield[J]. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2010, 34(1): 7-11.]
- 13 Tavakoli V, Rahimpour-Bonab H, Esrafil-Dizaji B. Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2011, 343(1): 55-71.
- 14 Bathurst R G C. *Carbonate Sediments and Their Diagenesis* [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975: 656.
- 15 Scholle P A, Ulmer-Scholle D S. 碳酸盐岩岩石学——颗粒、结构、孔隙及成岩作用[M]. 姚根顺,沈安江,潘文庆,等译.北京:石油工业出版社,2010:78-85.[Scholle P A, Ulmer-Scholle D S. *A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis*[M]. Translated by Yao Genshun, Shen Anjiang, Pan Wenqing, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 78-85.]
- 16 王恕一,蒋小琼,管宏林,等.川东北普光气田下三叠统飞仙关组储层成岩作用研究[J].*石油实验地质*,2010,32(4):366-372.[Wang Shuyi, Jiang Xiaoqiong, Guan Honglin, et al. Diagenesis effects of Lower Triassic Feixianguan Formation reservoir in Puguang gas field, northeast Sichuan[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(4): 366-372.]
- 17 Flugel E. 碳酸盐岩微相——分析、解释及应用[M]. 马永生,译.北京:地质出版社,2006:271.[Flugel E. *Microfacies of Carbonate Rocks——Analysis, Interpretation and Application* [M]. Translated by Ma Yongsheng. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 271.]
- 18 陶士振,郭宏莉,张宝民,等.沉积岩包裹体的岩相学、分类、术语及常被忽略的基本问题[J].*地质科学*,2003,38(2):275-280.[Tao Shizhen, Guo Hongli, Zhang Baomin, et al. Petrography, classification, terminology and fundamental questions ignored usually of inclusion in sediment rocks[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(2): 275-280.]
- 19 Sun S Q. Dolomite reservoirs: Porosity evolution and reservoir characteristics[J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(2): 186-204.
- 20 Warren J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1/2/3): 1-81.
- 21 王兴志,张帆,蒋志斌,等.四川盆地东北部飞仙关组储层研究[J].*地学前缘*,2008,15(1):117-122.[Wang Xingzhi, Zhang Fan, Jiang Zhibin, et al. A study of Feixianguan reservoir in Northeast Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 117-122.]
- 22 张学丰,刘波,蔡忠贤,等.白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性[J].*地质科技情报*,2010,29(3):79-85.[Zhang Xuefeng, Liu Bo, Cai Zhongxian, et al. Critical problems for dolomite formation and dolomitization models[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(3): 79-85.]

Carbonate Diagenetic System of Zhangxia Formation in West Shandong Province

FAN AiPing¹ YANG RenChao¹ HAN ZuoZhen¹ CUI MingMing¹ CAI Na²

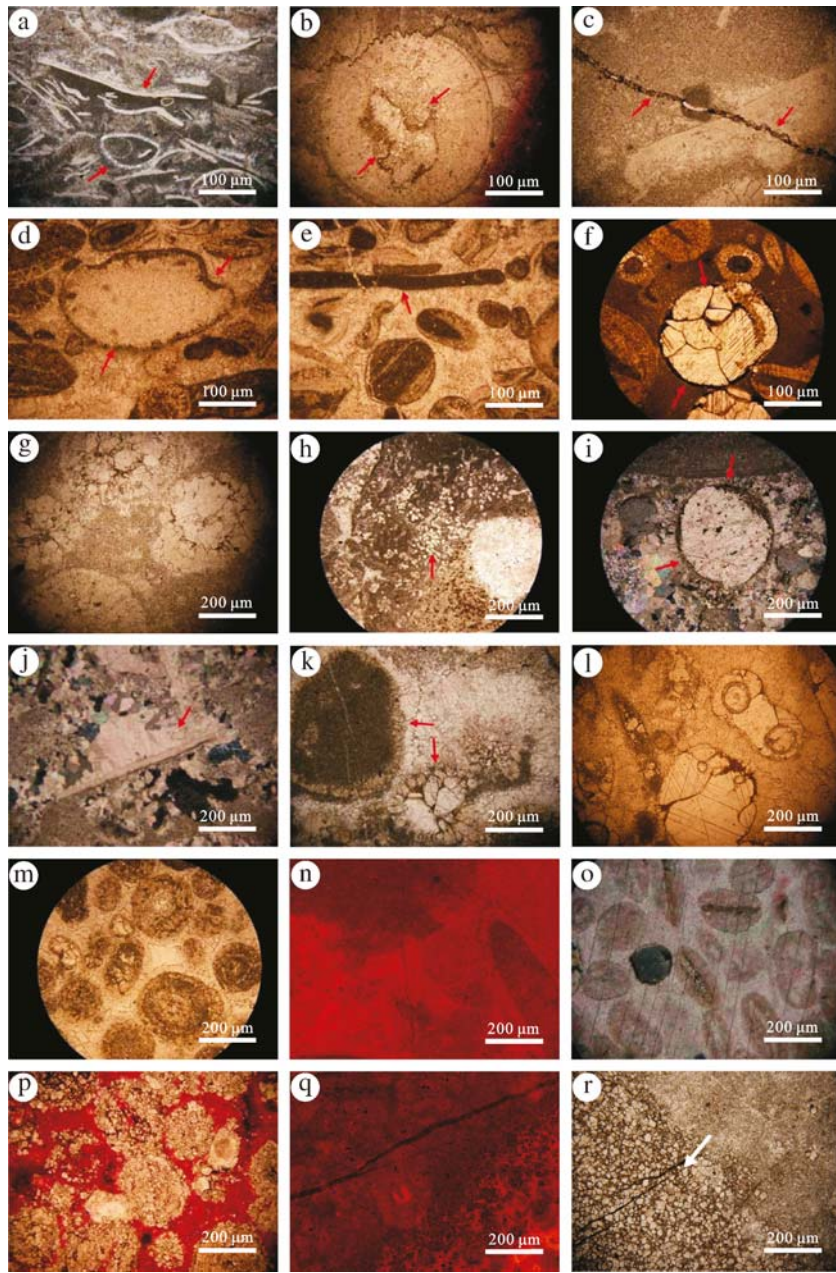
(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590;

2. Shandong Province Experimental Institute of Geological Science, Ji'nan 250013)

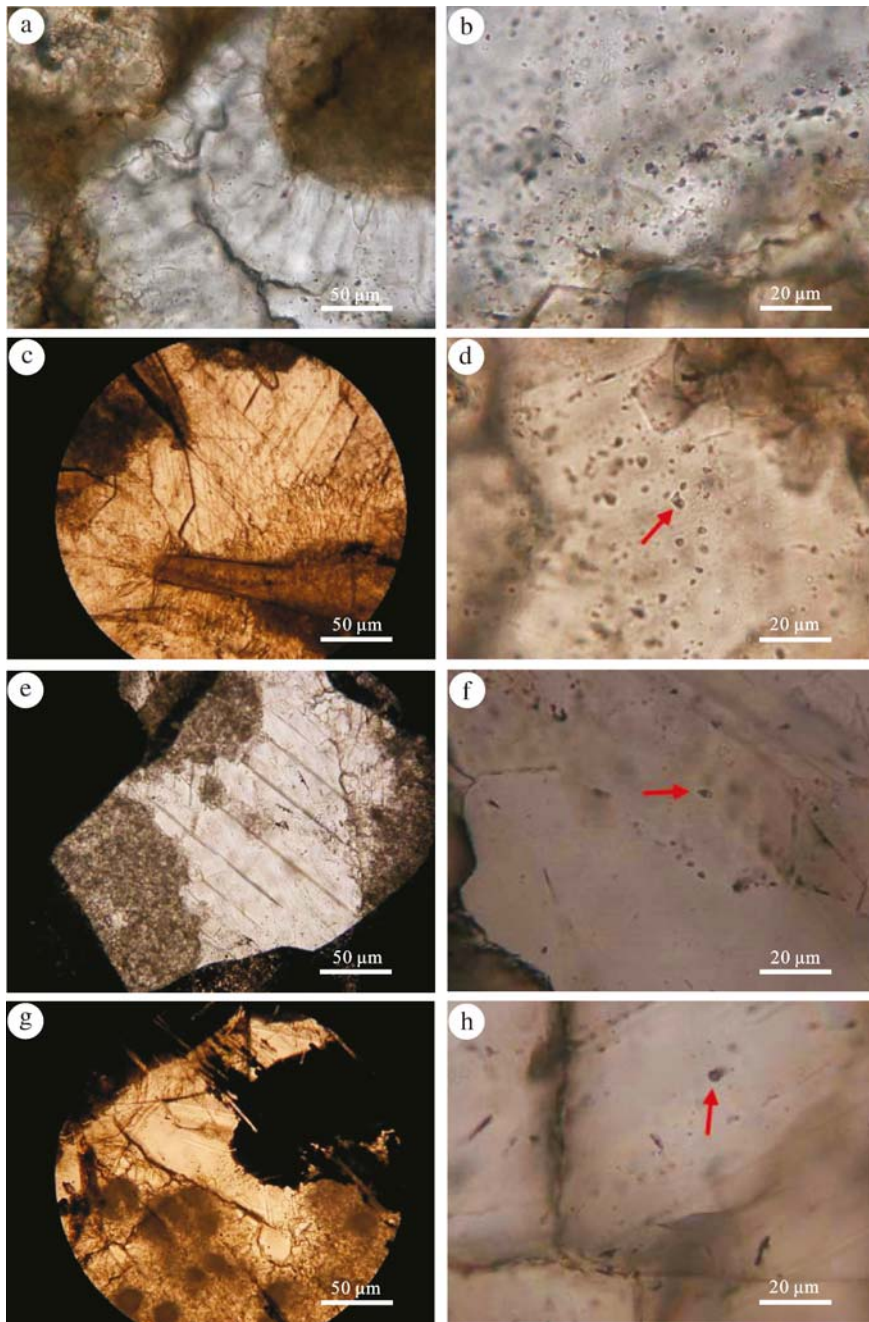
Abstract: Carbonate rock is widely developed in the Cambrian system in the west Shandong province but rare studies have been conducted on the diagenesis of the carbonate rock there. It can be inferred from microscopic observation of this study that there exist compaction and cementation as destructive diagenesis and dissolution, pressolution and dolomitization as constructive diagenesis in the studied area. Degrading neomorphism and aggrading neomorphism affect the physical properties of the rock differently, the former one makes little sense to improve the physical properties, while the latter one is conducive to the formation of inter-crystalline pores. Combined with the analysis of fluid inclusions, the Zhangxia Formation comprises four continuously evolved diagenetic systems, including seawater, freshwater, carbonate water and thermobaric water diagenetic systems where different diagenetic fluid systems and diagenesis types are developed. The seawater diagenetic system is characterized by low diagenetic temperature and single-phase fluid inclusion in the environment of the shallow seabed. Diagenesis in this system mainly involves compaction, micritization/cementation (to form fibriform, coaxial fibriform, coaxial proliferative cements), and dolomitization occurred to the oolite at the seawater-freshwater transition zone. In the freshwater diagenetic system, the early stage witnesses the pres-

ence of $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ low salinity water systems under the actions of isometric calcite cementation and freshwater dissolution; the ancient epidiagenetic stage and the epidiagenetic stage are manifested with the dissolution action. In the connate water diagenetic system, the diagenetic fluid systems are prevailed by $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-MgSO}_4$ and $\text{KCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ under the actions of cementation and presolution. And the diagenetic fluid systems for thermobaric water diagenetic system are dominated by $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-6H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-MgSO}_4$, $\text{MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{FeCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ under the modification of cementation, burial dissolution, presolution (in the form of coarse stylolite) and aggrading neomorphism. Both freshwater diagenetic system and thermobaric water diagenetic system are suitable for the development of dissolution. Most dissolved pores caused by selective dissolution in freshwater diagenetic system are merely filled with the cements produced in the later stage. But dissolution in thermobaric water diagenetic system can proliferate by 1% ~ 5% of secondary pores. Both the incompletely filled coarse stylolites that are produced from presolution and the inter-crystalline pores developed under aggrading neomorphism are helpful to improve the physical properties of the carbonate rocks.

Key words: West Shandong province; Cambrian system; diagenetic system; fluid inclusions; carbonate rocks



图版 I 说明 a.鲁西蒙阴剖面张夏组泥晶生屑灰岩,三叶虫、双壳类、腕足类生屑受机械压实作用呈定向排列,海水成岩环境、浅埋藏成岩环境,×100 单偏光;b.鲁西微山剖面张夏组泥晶鲕粒灰岩,连续和不连续锯齿状细缝合线在鲕粒中心和边部均有发育,主要出现在浅—中埋藏环境,×100 单偏光;c.鲁西苍山剖面张夏组泥晶生屑灰岩中,平直型粗缝合线,其中缝合线未被完全充填留有孔隙,且缝合线切穿生屑,中—深埋藏环境,×100 单偏光;d.鲁西蒙阴剖面张夏组棘皮动物边缘发生泥晶化作用,形成泥晶套,海水成岩环境,×100 单偏光;e.鲁西蒙阴剖面张夏组亮晶生屑鲕粒灰岩,整个三叶虫碎屑泥晶化,箭头所指为残余菌丝体,海水成岩环境,×100 单偏光;f.鲁西蒙阴剖面张夏组泥晶鲕粒灰岩,进变新生变形作用使鲕粒中的纹层被破坏,形成亮晶方解石,呈多晶鲕形式出现,×100 单偏光;g.鲁西微山剖面张夏组鲕粒灰岩中的泥晶发生进变新生变形作用,形成微亮晶,这种作用发生晚,中—深埋藏环境,×100 单偏光;h.鲁西微山剖面泥晶凝块灰岩,遭受大气淡水溶解,后期溶孔被亮晶方解石充填,×100 单偏光;i.鲁西微山剖面亮晶鲕粒灰岩,单晶鲕溶解发生较晚,溶蚀孔隙保存,发育两个世代胶结,第一世代为叶片状方解石环边胶结,第二世代为晶粒状方解石镶嵌胶结,×100 正交偏光;j.鲁西微山剖面,三叶虫生屑上发育的共轴纤维状方解石胶结物富含包裹体,呈云雾状,海水成岩环境,×50 正交偏光;k.鲁西微山剖面亮晶鲕粒灰岩,发育两个世代胶结,第一世代针状方解石,出现在海水渗流环境,第二世代叶片棱柱状方解石,为浅—中埋藏环境产物,×50 单偏光;l.同上;m.鲁西微山剖面亮晶鲕粒灰岩,发育两个世代胶结,第一世代叶片—棱柱状方解石等厚环边胶结,第二世代嵌晶状方解石胶结,出现在中—深埋藏成岩环境,×50 单偏光;n.鲁西九龙山剖面亮晶鲕粒灰岩,发育两个世代胶结,第一世代叶片—棱柱状方解石等厚环边胶结,发橙红色光,第二世代嵌晶状方解石胶结,发暗橙红色光,出现在中—深埋藏成岩环境,×50 阴极发光;o.鲁西微山剖面鲕粒灰岩中发育共轴增生方解石,呈云雾状,海水成岩环境,×50 正交偏光;p.具鲕粒残余结构的细晶白云岩,鲕粒内白云石化,晶间孔大,粒间充填方解石,孔隙不发育,×50 茜素红染色薄片;q.具环带构造的白云岩,白云石菱形晶体,自形程度高,阴极射线下呈现暗褐色—橙红色发光环带,×50 阴极发光;r.箭头所指自形菱面体白云石晶粒粗大,发育晶间孔隙,方解石为泥晶,孔隙不发育,×50 单偏光。



图版 II 说明 a.鲁西微山剖面鲕粒灰岩,叶片—棱柱状方解石胶结物中的两相盐水包裹体,×200 单偏光;b.鲁西微山剖面鲕粒灰岩,叶片—棱柱状方解石胶结物中的两相盐水包裹体呈面状分布,×500 单偏光;c.鲁西苍山剖面生屑灰岩,嵌晶状方解石胶结物中的两相盐水包裹体,×200 单偏光;d.鲁西苍山剖面生屑灰岩,嵌晶状方解石胶结物中的两相盐水包裹体和烃类包裹体共生,箭头所指为烃类包裹体,×500 单偏光;e.鲁西苍山剖面凝块灰岩,嵌晶状方解石胶结物中孤立分布的烃类包裹体,×200 单偏光;f.鲁西苍山剖面凝块灰岩,嵌晶状方解石胶结物中孤立分布的烃类包裹体,×500 单偏光;g.鲁西苍山剖面凝块灰岩,嵌晶状方解石胶结物中孤立分布的烃类包裹体,×200 单偏光;h.鲁西苍山剖面凝块灰岩,嵌晶状方解石胶结物中孤立分布的烃类包裹体,×500 单偏光。