

高邮凹陷南坡真武—曹庄地区戴南组砂岩成岩作用及其对储层性质的影响

李德勇^{1,2}, 张金亮³, 姜效典^{1,2}, 江志强⁴

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100

3. 北京师范大学资源学院, 北京 100875

4. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030

摘要: 在详细岩心观察描述的基础上, 利用铸体薄片、扫描电镜、压汞分析、X-射线衍射、埋藏史—热史模拟等多种分析测试手段, 对戴南组砂岩成岩作用特征进行了详细研究, 发现砂岩储层主要经历了压实、胶结、溶蚀和交代作用, 自生胶结物主要有高岭石等粘土矿物、铁碳酸盐、石英、长石及硬石膏等, 发生溶蚀则主要为长石和岩屑, 戴南组地层现今主要处于晚成岩的 A 期。戴南组砂岩储层主要受压实作用、高岭石胶结、铁碳酸盐胶结、石英次生加大及溶蚀作用的影响, 发育塑性组分溶蚀成岩相和高岭石充填成岩相的储层性质往往较好, 是有利的油气储集带; 而发育压实—充填成岩相和碳酸盐胶结成岩相的储层孔渗性能很差, 多为致密储层。

关键词: 成岩作用; 储层性质; 成岩相; 高邮凹陷; 石油地质。

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2013)01-0130-13

收稿日期: 2012-03-20

Diagenesis and Its Effect on Dainan Sandstone Reservoir in Zhenwu-Caozhuang Region of Southern Slope of Gaoyou Depression

LI De-yong^{1,2}, ZHANG Jin-liang³, JIANG Xiao-dian^{1,2}, JIANG Zhi-qiang⁴

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China

3. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4. Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200030, China

Abstract: Determination of the effects of diagenesis on Dainan sandstone reservoir in Zhenwu-Caozhuang region can facilitate the prediction of the beneficial oil reservoir. Based on core observation, the diagenetic characteristics of Dainan reservoir has been studied in detail by using case thin section, SEM, mercury penetration, X-ray and buried-thermal history modeling. Dainan sandstone has experienced such processes as the compaction, cementation, dissolution and metasomatism. Authigenetic cement includes clay mineral, ferrum carbonate, quartz, feldspar and anhydrite. Feldspar and fragment have mainly suffered dissolution. Dainan Formation is in the period A of mesodiagenesis. Dainan reservoir quality is mainly controlled by compaction, kaolinite cementation, ferrum carbonate cementation, overgrowth quartz and dissolution. Sandstone reservoirs in which dissolution or kaolinite infill diagenetic lithofacies develop commonly have higher porosity and permeability, while reservoirs developing compact-filling or carbonate cementation diagenetic lithofacies usually have poor physical property.

Key words: diagenesis; reservoir quality; diagenetic lithofacies; Gaoyou depression; petroleum geology.

高邮凹陷是苏北盆地油气最为富集的 2 个凹陷之一, 中、新生代沉积地层厚达 7 000 m。目前发现的

主要含油气层系有上白垩统泰州组、古近系阜宁组、戴南组和三垛组; 主要烃源岩系有泰州组二段、阜宁

基金项目: 国家科技支撑计划(No. 2006BAC18B05); 山东省自然科学基金(No. 2009ZRB02103)。

作者简介: 李德勇(1984—), 男, 讲师, 博士, 主要从事油气储层地质方面的研究及教学工作。E-mail: sdclqldy@163.com

组二段和四段三套,戴南组的原油主要来自阜四段烃源岩(钱基,2001).前人对高邮凹陷南坡戴南组的研究主要集中在层序地层、沉积相、构造样式以及隐蔽油气藏成藏模式方面(冯增昭等,1994;赵澄林和朱筱敏,2001;庞金梅和曹冰,2005;张喜林等,2005;李亚辉,2006;邱旭明等,2006;高丽坤等,2010;李梅等,2010),对储层的研究还非常薄弱,明确储层性质的主控地质因素和寻找优质储层分布成为油田生产实践亟需解决的问题.在沉积砂体分析的基础上,本文通过常规物性、铸体薄片、压汞分析、扫描电镜、X-射线衍射等多项分析测试方法,对戴南组砂岩物性特征、微观孔喉结构和成岩作用进行综合分析研究,旨在揭示储层演化规律,准确地评价储层和预测优质储层分布,为下一步优选勘探目标提供依据.

1 区域地质概况

高邮凹陷位于苏北盆地东台坳陷中部,南为通扬隆起,北接柘垛低凸起,东起白驹凹陷,西接菱塘桥低凸起与金湖凹陷相隔,东西长约100 km,南北宽约25~30 km,面积达2 670 km²,是晚白垩世仪征运动和古新世末吴堡运动控制形成的具有南断北超结构的箕状断陷盆地(陈安定,2001),凹陷长轴呈NE向展布,自南向北依次可划分为南部断阶带、中央深洼带和北部斜坡带3个次级构造单元,真武—

曹庄地区即位于南断阶的中段(图1).吴堡运动后,高邮凹陷进入过补偿断陷阶段,古气候温暖潮湿,盆地整体为陆相淡水—微咸水湖泊环境,发育一套河流—湖泊相砂泥岩地层.本次研究通过对16口取心井详细地岩心观察和描述,并结合丰富的地震、测井和录井资料,认为真武—曹庄地区戴南组砂岩储层为辫状三角洲沉积,钻井所见主要为辫状三角洲前缘亚相,包括水下辫状河道、河口砂坝、远砂坝及席状砂等微相.

2 储集层特征

2.1 碎屑岩石学特征

根据研究区191块岩样的薄片统计资料,戴南组储层砂岩岩性主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩(Folk,1981;赵澄林和朱筱敏,2001),部分为长石石英砂岩(图2).碎屑中石英含量38.1%~84.1%,平均67.88%;长石9.6%~29.0%,平均19.18%,包括钾长石和斜长石两种;岩屑3.0%~35.1%,平均12.94%,主要为中酸性火山岩、石英岩、硅质岩、花岗岩、沉积岩、片岩和千枚岩岩屑.碎屑岩结构成熟度中等,主要粒径分布区间介于0.01~0.50 mm,最大可达1.18 mm,颗粒圆度次棱—次圆状,分选中等—好,风化程度浅,胶结类型为孔隙—接触胶结.成分成熟度相对较高,介于0.62~4.88,平均2.01.

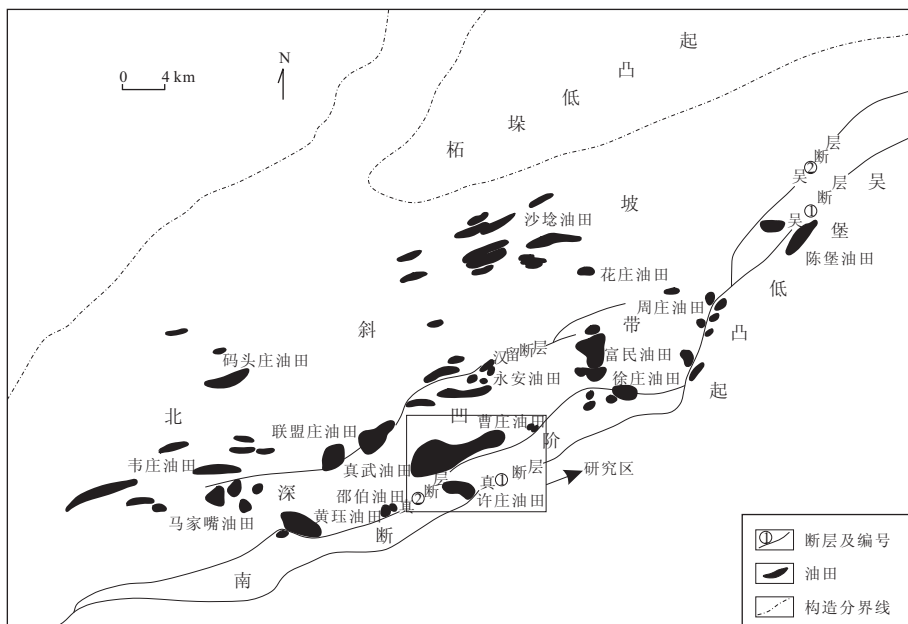


图1 研究区区域位置

Fig. 1 Location of research area

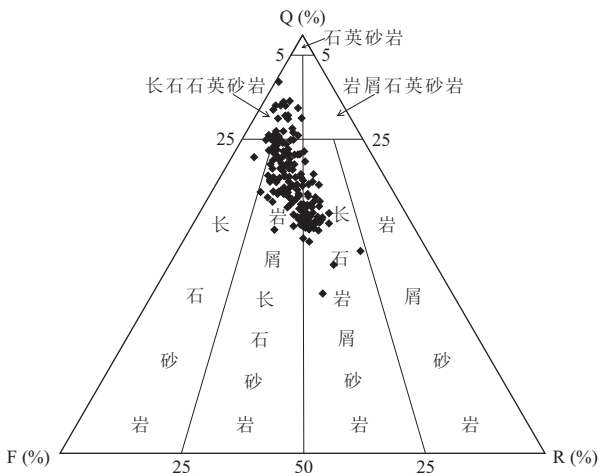


图 2 真武—曹庄地区戴南组砂岩类型

Fig. 2 The triangular plot of Dainan sandstone type

砂岩中的胶结物主要有碳酸盐(5.0%~34.2%)、粘土矿物(0.3%~16.0%)、石英(0.4%~4.0%)、硬石膏(少量样品可见)、长石(微量)及黄铁矿(微量)等,杂基则主要为泥质和泥灰质。

2.2 物性特征

据 16 口井 580 块无宏观裂缝岩样的物性资料分析,真武—曹庄地区戴南组储层孔隙度平均 16.44%,渗透率平均 $236.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,整体属于中低孔—中渗储层。戴一段储层孔隙度一般 2.2%~28.0%,平均 13.13%,频率分布曲线为单峰型,主峰位于 15%~20%;渗透率介于 $(1.0 \sim 319.8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $32.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,频率分布曲线呈双峰型,峰值分别位于 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $(10 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。戴二段整体显现低孔—低渗的储层特征;戴二段储层孔隙度在 2.0%~28.5%之间,平均 18.25%,频率分布曲线为单峰型,主峰在 20%~25%。渗透率介于 $(0.31 \sim 4054.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $345.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,频率分布曲线为双峰型,峰值分别介于 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $(100 \sim 1000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。戴二段属于中孔—中渗储层。

2.3 孔喉结构特征

根据铸体薄片和扫描电镜分析,戴南组储层孔隙类型以原生孔隙和次生孔隙的混合发育为特点,原生孔隙主要为残余粒间孔,次生孔隙则包括粒间溶孔、粒内溶孔、骨架颗粒溶孔、特大孔、裂隙和晶间孔隙,其中以残余粒间孔和粒间溶孔最为发育。薄片计点统计资料,储层面孔率在 1.76%~21.49%,平均 15.06%,包括粒间孔隙含量 5.65%,粒内溶孔

3.53%,骨架颗粒溶孔 3.25%,特大孔 2.63%;储层喉道发育有孔隙缩小型、缩颈状、片状或弯片状及管束状 4 种类型,以缩颈状和片状、弯片状喉道为主。平均孔隙半径介于 22.0~84.3 μm ,喉道半径在 0.92~3.10 μm 之间,孔喉配位数一般为 1~3,平均孔喉比为 7.92~17.38,孔喉均质系数为 0.44~0.78。真武—曹庄地区戴南组储层以中—小孔隙、细—中喉道组合为主。

3 成岩作用对储层性质的影响

3.1 压实和压溶作用

真武—曹庄地区戴南组砂岩经历了复杂的成岩演化过程,强烈的机械压实作用使碎屑颗粒发生紧密定向排列;石英等刚性颗粒表面镜下常见菱形解理纹,强烈时则形成微裂缝;火山岩岩屑、泥质岩岩屑及云母等塑性组分受挤压发生弯曲变形,甚至呈假杂基状充填于粒间孔隙和喉道中(图 3a),对储层的储集性和渗透性产生了极为不利的影响。压溶作用在区内表现为石英和长石的次生加大,其中以石英的加大生长为主,加大程度多在 II~III 级。碎屑颗粒的压溶生长使颗粒间的接触关系由点—线接触逐步演变为凹凸—缝合接触,连接孔隙的喉道因此变得越来越扁平狭窄,严重削弱了储层渗透性。参考 Houseknecht(1987)方法计算,戴南组储层压实作用减孔量在 9.89%~36.11%之间,平均达 23.29%(图 4,图 5a)。压实作用对储层性质的影响是绝对的、永恒的和不可逆的(Lundegard, 1992),它是戴南组储层原生粒间孔隙减少的最重要因素。

3.2 胶结作用

研究区戴南组砂岩中的自生胶结矿物有粘土矿物、碳酸盐、石英、长石、硬石膏及黄铁矿等,其中碳酸盐、粘土矿物和石英胶结作用对储层性质产生了重要影响。由 Houseknecht(1987)方法计算,戴南组储层胶结作用减孔量在 3.59%~11.22%之间,平均 6.64%(图 4)。

3.2.1 粘土矿物 粘土矿物胶结在戴南组砂岩中非常普遍。X-射线衍射分析表明,粘土矿物类型主要有高岭石(K)、绿泥石(Ch)、伊利石(I)和伊蒙混层(I/S)等,其在各种类型的砂岩中均有分布,主要见于粘土基质含量较高的细粒砂岩中。受埋藏成岩作用的影响,各种粘土矿物的结构类型和数量随着埋藏深度的增加会逐渐发生变化。

(1)高岭石。高岭石是戴南组辫状三角洲砂岩中

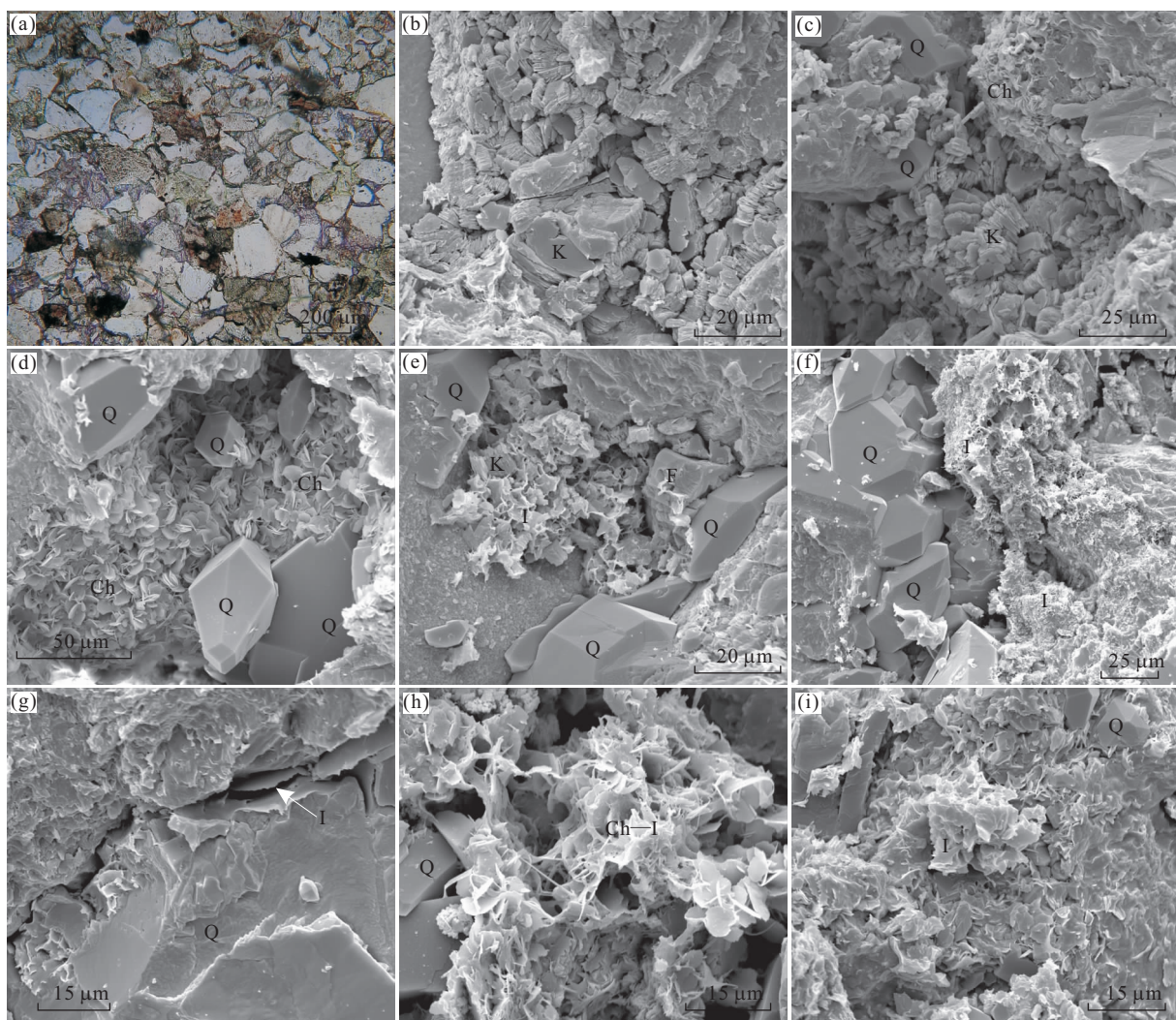


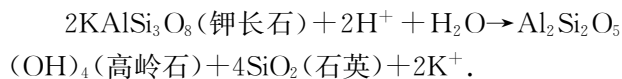
图 3 戴南组砂岩成岩事件铸体薄片和扫描电镜特征

Fig. 3 Optical and SEM photomicrographs

a. 碎屑压实呈假杂基化及局部含铁碳酸盐胶结, 肖 7 井, 3 104.6 m, 铸体片; b. 书本状、蠕虫状高岭石充填粒间孔隙且晶体具不同程度溶蚀, 真 98 井, 2 513.7 m; c. 粒表绿泥石包膜与孔隙充填高岭石, 曹 38 井, 2 627.8 m; d. 粒表绿泥石包膜与粒间孔隙中的绿泥石和自生石英, 曹 13 井, 3 225.9 m; e. 石英次生加大、粒间孔隙中伊利石污浊高岭石现象和自生长石, 肖 7 井, 3 104.6 m; f. 粒表伊利石粘土膜与粒间孔隙中的自生石英和伊利石, 真 86, 3 134.2 m; g. 石英次生加大与孔隙中的伊利石粘土桥, 肖 3 井, 3 129.9 m; h. 粒间孔隙中绿泥石和伊利石共生, 曹 21 井, 3 497.4 m; i. 粒表卷曲状伊利石膜和自生石英, 真 98 井, 2 573.9 m; K. 高岭石 (Kaolinite); Q. 石英 (Quartz); Ch. 绿泥石 (Chlorite); F. 长石 (Feldspar); I. 伊利石 (Illite).

含量最高的自生粘土矿物, 薄片点统计其平均含量为 2.31%。偏光显微镜下, 高岭石呈粉末状质点分布。电镜中, 高岭石多为假六方板状或不规则的板状, 一般 $5 \sim 15 \mu\text{m}$, 聚合物多表现为书本状, 少数呈蠕虫状分布。砂岩中高岭石结晶程度不一, 且多数遭受了一定程度的溶蚀, 导致晶棱残缺, 晶形不完整 (图 3b), 主要以填隙物的形式充填于粒间孔隙或长石溶蚀孔内, 常与自生石英伴生 (图 3c), 有时也可见其交代长石碎屑的现象。长石及其他铝硅酸盐矿物与酸性孔隙水介质反应释放 Al^{3+} 和 SiO_4^{4-} 离子

(Zhang *et al.*, 2008), 为辫状三角洲前缘砂体中高岭石和自生石英的沉淀提供了重要物质基础 (图 5h), 其反应式可表述如下:



戴南组砂岩多数粒间孔隙中都不同程度地发育高岭石晶体, 且部分高岭石充填于喉道中。高岭石的这种产状不仅占据了孔隙空间, 使残余粒间孔隙进一步收缩, 同时其集合体遇水易破碎的特性极易堵塞连通孔隙的喉道, 严重影响了储层的渗滤能力 (张

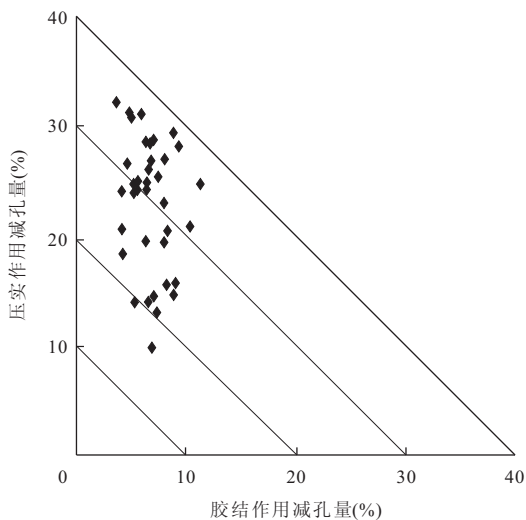
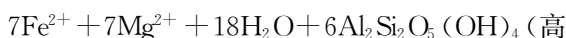


图 4 戴南组砂岩压实作用与胶结作用减孔评价

Fig. 4 The triangular plot of compaction porosity loss versus cementation porosity loss of Dainan sandstone

金亮等, 2004). 但由于晶格间存在大量微孔隙, 粒间高岭石不仅没有完全堵塞孔隙, 反而在一定程度上对粒间孔隙的保存起着积极作用, 区内高岭石含量与面孔率呈弱的正相关关系也证明了这点(图 6a). 此外, 高岭石的大量出现与长石等铝硅酸盐的溶蚀有直接关系. 因此, 高岭石富集的三角洲前缘水下辫状河道和河口砂坝砂体往往具有较好的孔渗性.

(2) 绿泥石. 绿泥石是本区储层中常见的自生粘土矿物, 含量相对较高, 平均 1.18%. 扫描电镜观察, 绿泥石多为针叶状或叶片状, 杂乱堆积, 如片片散落的柳叶, 聚合体常呈玫瑰花朵状或绒球状. 戴南组砂岩中的绿泥石主要有两种赋存形态和产状, 即早期的环边衬垫绿泥石和晚期的孔隙充填绿泥石. 孔隙衬垫绿泥石在区内不发育, 其以环边或薄膜的形式生长在碎屑颗粒表面, 环边厚度较薄, 小于 $7\ \mu\text{m}$, 且发育不完整, 未形成完整的包裹颗粒的粘土膜(图 3c), 多来自早期偏碱性孔隙水的沉淀, 仅在曹 13 井的样品中见到了发育较好的绿泥石包膜(图 3d); 孔隙充填绿泥石在戴南组砂岩中较为普遍, 表现为较好的花朵状和绒球状, 并与自生石英和钠长石晶体共生(图 3d 和图 5f), 还可见其充填长石溶蚀孔隙的现象, 多形成于骨架颗粒溶蚀之后的较晚期成岩阶段, 高岭石等粘土矿物转化和长石蚀变是其主要的物质来源. 在深处蒙皂石转化为伊利石释放 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} , 铁、镁与高岭石反应则形成绿泥石, 反应式如下(郑浚茂和庞明, 1989):



岭石) $\rightarrow \text{Fe}_7\text{Mg}_7\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{40}(\text{OH})_{32} (\text{绿泥石}) + 28\text{H}^+$.

绿泥石的沉淀受物源和沉积环境的控制, 多见于河流三角洲和滨岸环境, 真武—曹庄地区的辫状三角洲前缘砂体为其形成提供了特定物源和环境条件. 孔隙衬垫绿泥石由放射状绿泥石晶体向孔隙中心生长构成, 晶体间有大量微孔隙, 可以允许酸性孔隙水的通过, 有利于储层的后期改造, 同时绿泥石粘土膜的存在阻碍了碎屑颗粒的次生加大, 对原生粒间孔隙的保存起着积极作用; 晚期孔隙充填绿泥石不仅占据粒间孔隙和碎屑溶蚀孔隙, 而且极易堵塞喉道, 使连接孔隙的喉道变得越来越曲折狭窄, 大大降低了储层渗透性(田建锋等, 2011). 戴南组砂岩中绿泥石环边不发育, 主要为绿泥石充填物, 因此绿泥石并未起到改善区内储层性质的作用, 反而是随绿泥石充填物含量增加砂岩面孔率逐渐减小(图 6b).

(3) 伊利石. 伊利石是戴南组砂岩中普遍存在的一种粘土矿物, 含量一般 0.4%~2.7%, 平均 1.03%. 伊利石在电镜中多呈丝片状、丝缕状、卷曲波片状充填粒间孔隙或以粘土包膜形态披盖在碎屑颗粒表面(图 3e、3f). 波片状伊利石常在碎屑颗粒间形成搭桥式生长, 不仅分割了孔隙空间, 更重要的是阻隔了喉道(图 3g), 对储层的渗滤能力产生了极为不利的影 响. 絮状或卷曲波状伊利石表膜由于晶体镶嵌紧密, 且厚度很薄, 对原生孔隙的保存也没有实际意义(图 3i). 因此可以推测, 伊利石粘土矿物的发育主要对戴南组砂岩储层产生了一些破坏作用(图 6c). 在研究区, 随深度增大伊利石含量有逐渐增加的趋势, 通常形成于晚成岩阶段. 在真武地区常见伊利石与绿泥石共生(图 3h), 也可见其污浊、交代高岭石的现象(图 3e), 多发育于辫状三角洲前缘河口砂坝和远砂坝的粉细砂岩中. 蒙皂石的转化和高岭石的蚀变是区内伊利石矿物主要的物质来源(姚合法等, 2004).

(4) 伊蒙混层. X-射线衍射分析, 伊蒙混层是真武—曹庄地区戴南组砂岩中广泛存在的自生粘土矿物. 伊蒙混层形态介于伊利石和蒙皂石之间, 电镜下呈棉絮状覆盖在颗粒表面或充填于孔隙中. 本区伊蒙混层矿物纵向分布表现出由少变多、再变少的特征, 这是因为浅层蒙皂石层随深度增大逐渐向伊蒙混层转化, 而达到一定界限后, 深层碱性水又促使伊蒙混层向伊利石转化的缘故.

3.2.2 碳酸盐 戴南组砂岩中的碳酸盐胶结作用非常普遍, 包括方解石、铁方解石和铁白云石等, 平均含量 10.66%, 最高可达 42.6%, 其中以铁方解石和铁白云石为主, 方解石含量相对较少, 主要以孔隙

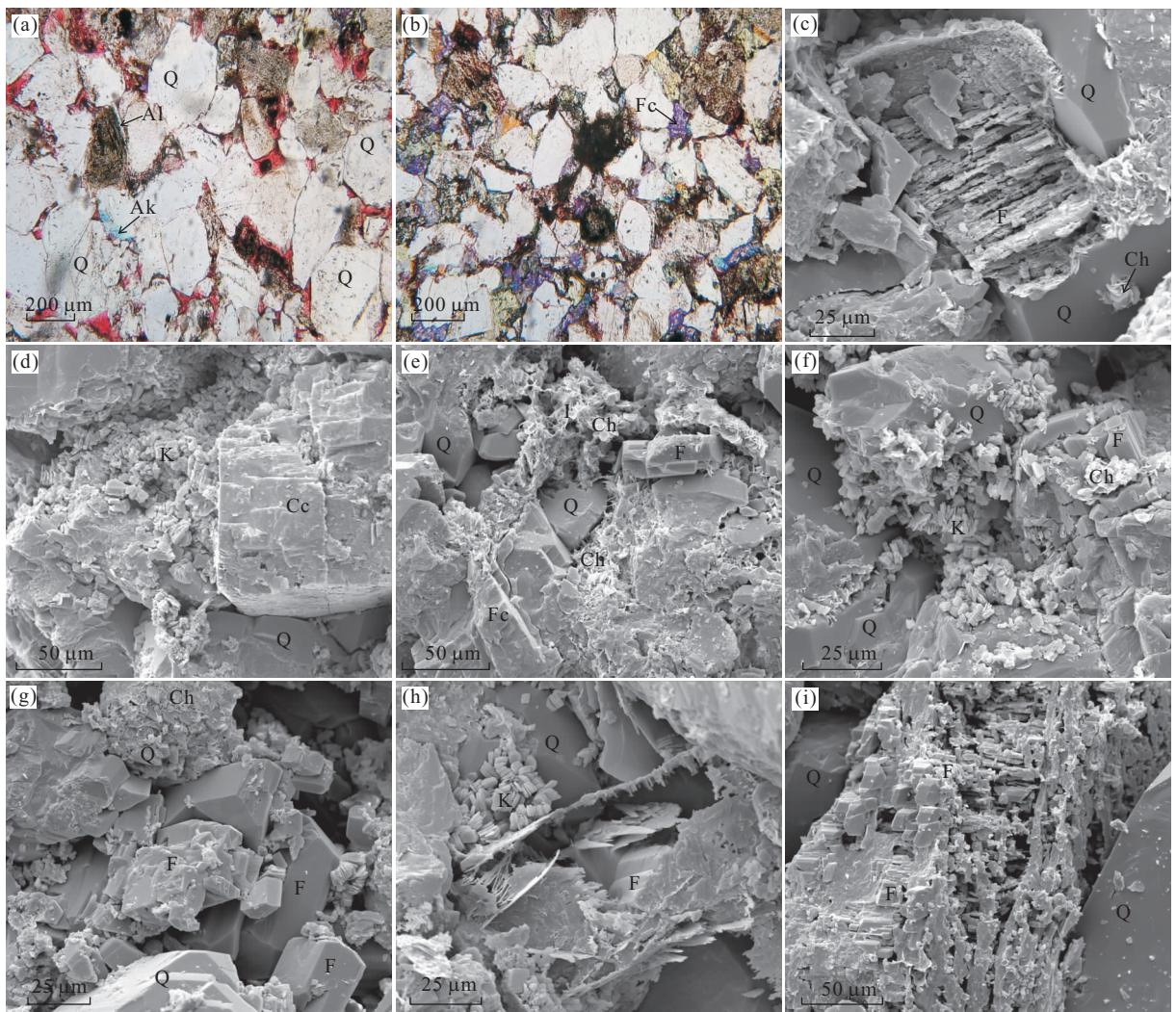


图5 戴南组砂岩中自生矿物铸体薄片和扫描电镜特征

Fig. 5 Optical and SEM photomicrographs

a. 石英压溶加大、钠长石加大边与铁白云石交代碎屑,真86井,3134.2 m,铸体薄片;b. 含铁碳酸盐胶结及其交代碎屑,真157井,2837.6 m,铸体薄片;c. 长石碎屑溶蚀、石英次生加大与自生绿泥石,曹13井,3225.9 m;d. 粒间书本状高岭石和粒状方解石晶体,曹38井,2627.8 m;e. 粒间孔中的铁方解石、自生长石、自生石英、绿泥石和伊利石,曹21井,3497.4 m;f. 石英、长石次生加大与粒间孔中的高岭石,曹38井,2648.6 m;g. 粒表绿泥石、自生石英与粒间孔隙中的板条状自生长石,真157井,2837.6 m;h. 长石溶蚀与粒间孔隙中的高岭石和自生石英,真80井,2863.8 m;i. 长石溶蚀及其粒表自生长石生长与石英次生加大,真86井,3134.2 m;Al. 钠长石(Albite);Ak. 铁白云石(Ankerite);Fc. 铁方解石(Ferrocalcite);Cc. 方解石(Calcite);Q. 石英(Quartz);Ch. 绿泥石(Chlorite);F. 长石(Feldspar);I. 伊利石(Illite);K. 高岭石(Kaolinite)

物的形式存在.早期方解石多形成于成岩阶段的早期,在电镜下呈不规则立方体状充填于孔隙中(图5d),未见完全堵塞孔喉的连晶状基底胶结现象,它的这种产状为溶蚀作用发生和次生孔隙形成提供了前提条件和物质基础;晚期碳酸盐矿物主要指铁方解石和铁白云石,具晶粒结构,呈团块状、嵌晶状和栉壳状充填原生或次生孔隙(图5b、5e),多形成于晚成岩阶段.据染色薄片观察,铁方解石常沿颗粒边缘对碎屑和粘土覆膜交代,这表明它是沉积物受到普遍压实后,孔隙流体再次活跃的产物,同时铁白云石附着铁方解石边缘生长的产状则说明铁白云石主

要是铁方解石的交代产物(图5b).

火成岩的喷发和侵入促进了戴南组砂岩中铁碳酸盐矿物的形成和沉淀.苏北盆地是中国东部火成岩发育的主要地区,表现为玄武岩喷发和辉绿岩侵入,以三垛组和盐城组岩浆活动对戴南组影响最大(姚合法等,2004).火山喷发岩、凝灰岩及火山灰为戴南组砂岩中铁碳酸盐提供了含Fe、Mg质的碎屑物源.同时,岩浆侵入则导致流体介质性质和受热机制发生变化,促使长石和火山岩岩屑等组分溶蚀及粘土矿物转化释放所需离子,为铁碳酸盐的析出起到一定的积极作用.

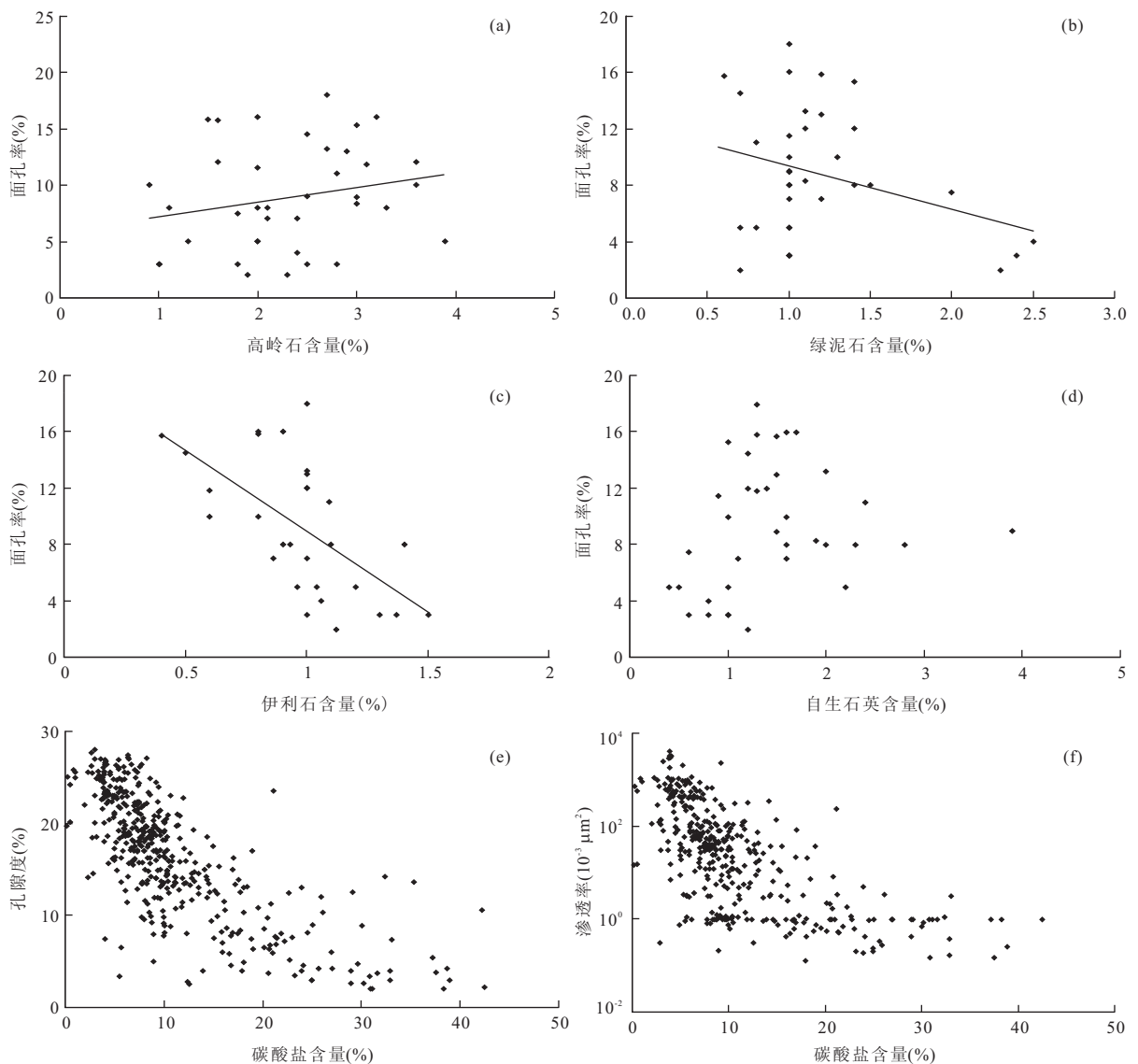


图 6 戴南组砂岩储层孔渗与胶结物含量关系

Fig. 6 Scatter diagrams showing relationship between poroperm and cement

连晶状生长的晚期碳酸盐矿物不仅充填原生粒间孔隙,而且也充填于溶蚀作用所形成的次生孔隙中,造成孔隙度和渗透率明显减低(李红等,2006)。同时,由于晚期碳酸盐矿物致密胶结后难以再次遭受溶蚀形成大量次生孔隙,往往形成低孔渗性储层(图 5b)。真武—曹庄地区戴南组砂岩储层孔隙度和渗透率与碳酸盐含量呈负幂指数关系(图 6e、6f),由碳酸盐(特别是铁碳酸盐)胶结造成的孔隙度损失在 5%~35%之间,晚期铁碳酸盐胶结是戴南组储层性质的主要控制因素。

3.2.3 石英次生加大与自生 石英次生加大与自生是真武—曹庄地区戴南组砂岩中常见的一种成岩现象,薄片统计含量较高,一般 0.4%~3.9%,平均

1.44%。石英次生加大边是溶解于地层水中的硅质以石英碎屑表面为基底生长而成的,几乎可见于每张薄片。由于碎屑表面粘土膜的存在,石英加大边往往宽而不连续,在某些粘土膜不发育的砂岩中,石英的压溶再生现象较为普遍(图 5a)。研究区戴南组砂岩存在多期石英加大,加大强烈者可使颗粒恢复面平棱直的规则几何外形(图 5f 和 5i),加大程度在 II~III 级,并有随深度增加而增大的趋势,局部形成对绿泥石晶体的包裹(图 5c),显示了晚期成岩作用的特点;在碎屑颗粒表面、粒间孔隙或长石次生孔隙内常见到晶形完好的石英晶体出现,多与自生绿泥石晶体伴生(图 3d, 3e, 3f)。区内石英的加大和自生与长石的溶蚀密切相关(图 5c 和 5i),说明长石

的溶解为石英的沉淀提供了物质来源,同时粘土矿物的转化也是硅质的重要来源。

研究区戴南组储层面孔率随石英胶结物含量增加呈先增大后减小的趋势。当石英胶结物含量为1.3%左右时,砂岩面孔率达到最大;当石英胶结物含量小于1%或大于2%时,砂岩面孔率均降低到10%以下(图6d)。由此可知,石英颗粒具有抗压性,一定数量石英胶结物的发育对原生孔隙的保存起着积极作用,但当其含量较高时,又会占据过多的孔隙空间而使储层性质变差。石英胶结作用是影响戴南组储层性质的重要因素之一,对改善储层具有两面性。

3.2.4 长石加大与自生 长石颗粒的加大与自生在研究区戴南组砂岩中并不普遍,薄片含量也较低,平均只有0.85%。某些斜长石因向粘土矿物蚀变而变得浑浊,但自生部分却均匀光洁,为钠长石(图5a)。电镜中,自生长石多呈板条状充填孔隙(图5g)。长石的加大和自生多出现在发生长石碎屑溶蚀的细砂岩中(图5i),对储层性质的影响不大。

3.3 溶蚀作用

真武—曹庄地区戴南组砂岩中的溶蚀作用主要出现在长石、火山岩岩屑和碳酸盐胶结物中,其中以长石和岩屑的溶蚀为主,产生了大量次生孔隙。薄片中,被溶长石往往具有港湾状或锯齿状边缘,溶解强烈时可呈残骸状,电镜下常见其溶蚀成蜂窝状、窗格状和残骸状,形成粒内溶孔、包壳孔、肋骨状孔和铸模孔(图5c,5h,5i);研究区岩屑溶蚀多呈蜂巢状,形成大量粒内孔,同时所释放出的 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 为绿泥石和含铁碳酸盐的沉积提供了物质基础。戴南组砂岩储层中溶蚀作用产生的次生孔隙量在2%~10%之间。溶蚀作用主要发生于地层水流动畅通的辫状三角洲分流河道和河口砂坝砂体中,是研究区储层性质改善的最重要因素。

溶蚀作用的发生与地层中烃源岩有机质热演化成熟释放有机酸有关。有机酸在高温下发生脱羧作用产生 CO_2 , CO_2 溶于水形成碳酸,对长石、岩屑和碳酸盐矿物形成溶蚀;或者有机酸直接电离产生 H^+ ,使砂岩中的易溶矿物发生溶解。总之,成岩过程中,有机与无机因素共同作用,使铝硅酸盐溶解形成次生孔隙(Salman *et al.*, 2002),从而达到改善储层性质的效果。

3.4 交代作用

交代作用是戴南组砂岩常见的一种成岩作用类型,主要的交代现象有铁方解石、铁白云石交代石英、长石和岩屑,粘土矿物交代石英,高岭石交代长

石,铁白云石交代铁方解石等(图5a,5b)。含铁碳酸盐和粘土矿物对碎屑颗粒交代发生选择性溶解形成贴粒缝,可对储层性质的改善起到一定作用,但由于含量很少,实际意义并不大。

4 成岩序列与成岩阶段划分

根据真武—曹庄地区沉积埋藏史研究,结合戴南组砂岩中自生矿物种类和形成次序、粘土矿物组合及伊蒙混层转化、镜质体反射率及古地温等多项指标,可确定研究区戴南组砂岩经历了早成岩期和晚成岩期,现今正处于晚成岩的A期(图7)。

受区域构造运动控制,高邮凹陷的形成经历了3个主要阶段,即仪征运动造成的弱补偿拉张断陷期、吴堡运动造成的过补偿断陷期和三垛运动造成的拗陷期,三垛运动导致的地层隆升对戴南组成岩演化产生了较大的影响。参考前人研究成果(刘小平等,2005;平宏伟和陈红汉,2011),取高邮凹陷古地表温度 $20.4^{\circ}C$,地温梯度 $4.1^{\circ}C/100m$,现今地表温度 $14.6^{\circ}C$,地温梯度 $2.82^{\circ}C/100m$,对戴南组地层成岩演化过程进行了详细研究。由此可知,自开始沉积至三垛组中期,戴南组地层受渐进埋藏作用的影响,碎屑砂岩由早成岩期逐步进入晚成岩A期,底部部分地层则已达到晚成岩B期。早成岩阶段,机械压实作用强烈,砂岩中原生粒间孔隙被破坏殆尽,储层孔隙度直线下降;碎屑颗粒粒表开始出现较多的粘土薄膜,主要为早期的孔隙衬垫绿泥石包膜,绿泥石衬垫对原生粒间孔隙的保存起着一定的作用,但由于数量有限,对改善储层性质意义不大;早期方解石也逐渐沉淀析出,强烈者可形成连晶状基底胶结结构,造成储层的致密低渗透化。据综合分析,由于物质来源缺乏,戴南组砂岩并未形成大面积连晶状方解石胶结物,早期碳酸盐胶结作用相对较弱。进入晚成岩期,随着埋深加大,地层温度升高,下伏阜四段烃源岩进入生烃门限,生油岩有机质成熟释放有机酸,孔隙水变为酸性,戴南组砂岩中长石、岩屑和部分碳酸盐矿物遭受溶蚀,生成了大量次生孔隙,储层性质得到一定程度的改善;长石溶蚀的同时,高岭石矿物开始大量出现;随酸性水消耗,地层水变为碱性,伊蒙混层开始大量向伊利石转化;由岩屑溶蚀提供 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 离子,部分伊蒙混层和高岭石变得不稳定而向绿泥石转化,即晚期的孔隙充填绿泥石;早期碳酸盐与 Fe^{2+} 离子结合,开始大量转变为含铁碳酸盐,造成局部储层的致密胶结,严重影响储层性质。受三垛运动影响,真武—曹庄地区地层自三垛组中期开始抬升,并在

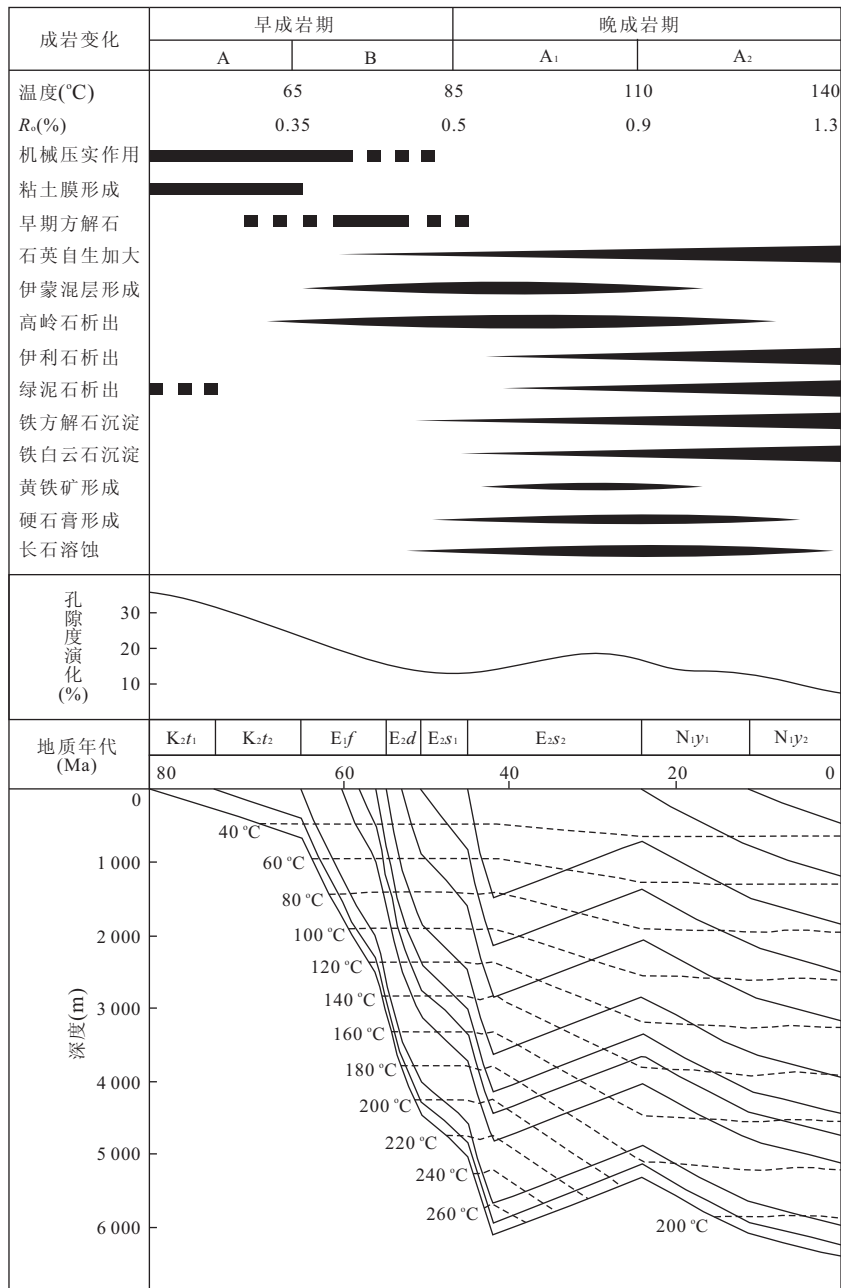


图 7 戴南组砂岩成岩演化阶段
Fig. 7 Diagenetic stages of Dainan Formation

三垛组末期达到最大,此时期内戴南组地层仍主要处于晚成岩期,仅顶部部分地层进入早成岩 B 期,但未遭受表生成岩作用影响,而后戴南组地层重新进入持续埋深阶段,现今已进入晚成岩 A 期。

5 成岩相与有利储层预测

成岩相是储层形成环境和成岩事件的综合响应,与储层质量密切相关(钟广法和邬宁芬,1997)。通过成岩相研究,可以确定储层中发生的主要成岩

事件,进而对成岩作用造成的储层损害或改善进行评价,最终达到预测优质储层发育区带的目的。

5.1 成岩相划分

戴南组辫状三角洲前缘亚相砂体所经历的主要成岩事件有压实作用、胶结作用(粘土矿物、碳酸盐、自生石英)和溶蚀作用,经铸体薄片和扫描电镜观察,其成岩岩相可划分为塑性组分溶蚀成岩相、高岭石充填成岩相、石英次生加大成岩相、碳酸盐胶结成岩相和压实—充填成岩相 5 种(图 8)。不同微相带砂体往往因为发育不同的成岩相类型而具有各异的

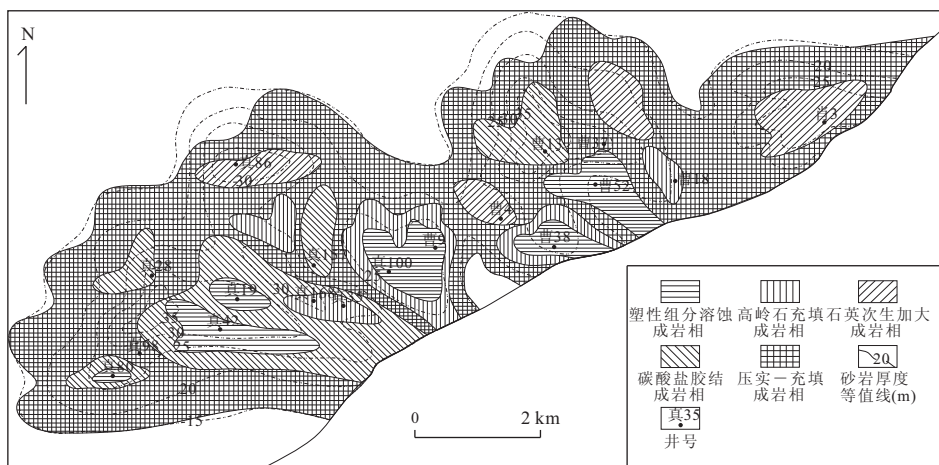


图8 真武—曹庄地区戴—1亚段储层成岩相分布预测

Fig. 8 Distribution of diagenetic facies of E_2d_1 sandstone reservoir

储集渗透能力。

(1)塑性组分溶蚀成岩相. 以长石、火山岩岩屑和碳酸盐胶结物等塑性组分的溶蚀为特征,是产生次生孔隙的主要成岩相,对改善深部强压实储层性质起着关键作用. 戴南组辫状三角洲前缘水下辫状河道和河口砂坝砂体主要发育此种成岩相类型,其孔隙类型有原生粒间孔隙、粒间溶孔、骨架颗粒溶孔及特大孔隙等,大量次生溶孔的出现使其构成高孔渗性储集层,是有利的油气聚集相带。

(2)高岭石充填成岩相. 自生高岭石矿物在粒间孔隙中结晶析出,形成以高岭石充填为主的胶结结构. 高岭石的沉淀与长石颗粒的溶蚀有很大关系,且高岭石晶体间常常存在大量微孔隙,同时高岭石集合体充填孔隙可以阻碍压实作用进行. 因此,发育高岭石充填成岩相的砂体多具有相对较好的储渗性能. 辫状三角洲前缘河口砂坝和部分水下辫状河道砂体多发育高岭石充填成岩相。

(3)石英次生加大成岩相. 戴南组辫状三角洲前缘水下辫状河道、河口砂坝及远砂坝砂体中粘土基质含量少、粒度较细、岩石结构好的细砂岩和粉细砂岩中多发育石英次生加大成岩相,其以碎屑石英的普遍压溶加大为特点,导致粒间孔隙收缩,特别是造成连接孔隙的喉道变得曲折狭窄,严重损害了储层渗透性. 石英次生加大对储层的损害是不可逆的,发育该种成岩相的储层往往意味着低渗透性。

(4)碳酸盐胶结成岩相. 以碳酸盐矿物的致密胶结为特征,戴南组辫状三角洲砂岩以晚期含铁碳酸盐胶结为主,呈斑块状充填粒间孔隙形成基底胶结结构,多发育于远砂坝、部分河口砂坝和下水下辫状河

道侧翼砂体中. 发育该成岩相的储层孔渗性很差,多为非渗透储层。

(5)压实—充填成岩相. 辫状三角洲前缘席状砂、远砂坝及辫状河道间相带砂岩粒度细、泥质杂基含量高,机械压实作用强烈,粒间孔隙被大量破坏,孔隙类型主要为粘土充填物中的微孔隙,喉道细小,储层孔隙度和渗透率非常低,属于致密储层。

5.2 成岩相控制因素

戴南组砂岩成岩相平面展布具有成扇分片的特征,与沉积相和砂体分布形态相似,主要受物源区母岩性质、沉积微相及岩浆活动等因素的影响。

戴南组沉积前,高邮凹陷岩浆活动频繁,源区母岩类型丰富,主要有玄武岩、花岗闪长岩、安山岩及中酸性喷发岩等,以长英质物质和再旋回沉积物质为主,受中基性物质影响(张妮等,2012). 火山碎屑物质中富含丰富的Fe、Si、Al、Mg、Ca、K及Na等元素,为砂岩中粘土矿物、碳酸盐、石英等胶结成岩相的发生提供了物质来源. 例如,大量的火山岩岩屑易被溶蚀形成塑性组分溶蚀成岩相,火山玻璃蚀变大量生成石英形成石英次生加大成岩相,Fe质大量沉淀形成晚期碳酸盐致密胶结成岩相。

砂体沉积微相与成岩相密切相关,通常辫状河道、河口砂坝和远砂坝砂体多发育塑性组分溶蚀成岩相、高岭石充填成岩相及石英次生加大成岩相,而席状砂、分流间砂体则主要发育碳酸盐胶结成岩相和压实—充填成岩相. 辫状河道与砂坝砂体岩性粗、砂质纯净、粘土杂基含量少,原始孔渗性好,有利于酸性流体流动,可使铝硅酸盐矿物大面积溶解形成溶蚀相,长石溶蚀则形成高岭石充填相. 席状砂等细

粒砂岩粘土基质含量高,常与泥岩直接接触,易被压实形成充填相,同时泥岩中的 HCO_3^- 进入可形成碳酸盐胶结相(李红等,2006)。

戴南组沉积后,三垛组和盐城组岩浆活动对成岩过程产生了较大影响. 岩浆活动使地层温度异常升高,未熟烃源岩开始成熟释放有机酸,使得长石等矿物蚀变为高岭石,形成溶蚀相或高岭石充填相. 同时,岩浆带来的 Fe、Mg 及 Si 等使孔隙水离子过饱和,碳酸盐及石英由此大量沉淀析出形成致密胶结相。

6 结论

(1)戴南组砂岩主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,部分为长石石英砂岩. 砂岩储层孔渗值偏低,整体属于中低孔—中渗储层,以原生孔隙和次生孔隙的混合发育为特征,喉道则以缩颈状、片状和弯片状为主,孔喉组合主要为中—小孔隙、细—中喉道组合。

(2)戴南组储层经历了压实、胶结、溶蚀和交代等多种成岩作用的改造. 砂岩中主要的自生矿物有高岭石、绿泥石、伊利石、铁方解石、铁白云石、方解石、伊蒙混层、石英及长石等,其中以高岭石等粘土矿物、含铁碳酸盐和自生石英为主. 溶蚀作用主要见于长石颗粒和火山岩岩屑中,交代作用则主要为粘土和含铁碳酸盐对碎屑颗粒的交代. 戴南组地层现今主要处于晚成岩的 A 期。

(3)压实作用和碳酸盐胶结作用严重破坏了戴南组储层性能,溶蚀作用则对储层性质的改善起到关键作用. 储层中压实作用造成的减孔量达 23.29%,胶结作用减孔量为 6.64%,溶蚀作用增加的孔隙量则在 2%~10%之间. 由于晶格间存在大量微孔隙,高岭石胶结在一定程度上对粒间孔隙的保存起着积极作用;绿泥石和伊利石充填胶结使得储层储渗性能减低;自生石英胶结对储层性质的影响具有两面性,一定量的石英具有抗压保存孔隙的作用,含量过高时则大量占据孔隙空间对储层产生破坏作用。

(4)戴南组辫状三角洲储层中可划分出塑性组分溶蚀成岩相、高岭石充填成岩相、石英次生加大成岩相、碳酸盐胶结成岩相和压实—充填成岩相 5 种,成岩相是不同砂体成岩变化和储渗性能演化的综合响应. 辫状三角洲前缘水下辫状河道和河口砂坝砂体因多发育塑性组分溶蚀成岩相和高岭石充填成岩相,往往具有较好的储层性质,是有利的油气储集

层;发育碳酸盐胶结成岩相和压实—充填成岩相的远砂坝、席状砂及河道间相带砂体孔渗值偏低,多为致密储层。

致谢:本文在资料收集和岩心取样分析过程中得到了中国石化江苏油田分公司相关部门的帮助和支持,在此表示衷心的感谢,同时也感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

References

- Chen, A. D., 2001. Dynamic Mechanism of Formation of Dustpan Subsidence, Northern Jiangsu. *Geological Journal of China Universities*, 7(4): 408—418 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z. Z., Wang, Y. H., Liu, H. J., 1994. China Sedimentology. Petroleum Industry Press, Beijing, 427—480 (in Chinese).
- Folk, R. L., 1981. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Company, Austin Texas, 107.
- Gao, L. K., Lin, C. M., Yao, Y. L., et al., 2010. Sedimentary Facies and Evolution of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(4): 706—716 (in Chinese with English abstract).
- Houseknecht, D. W., 1987. Assessing the Relative Importance of Compaction Processes and Cementation to Reduction of Porosity in Sandstones. *AAPG Bulletin*, 71(6): 633—642.
- Li, H., Liu, Y. Q., Liu, L. Y., 2006. Diagenesis of Chang 81 Reservoir with Low Permeability in Xifeng Oilfield, Ordos Basin. *Oil and Gas Geology*, 27(2): 209—218 (in Chinese with English abstract).
- Li, M., Jin, A. M., Lou, Z. H., et al., 2010. Hydrochemical Properties of Formation Water and Its Relationship with Oil and Gas Migration and Accumulation in Zhenwu Area of Southern Gaoyou Sag. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 34(5): 50—56 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1673—5005.2010.05.009
- Li, Y. H., 2006. Study of Control Mechanism of Oil and Gas by the Transfer Zone in the Gaoyou Sag of the North Jiangsu Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 28(2): 109—112 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. P., Wang, J. F., Li, H. B., 2005. Study on Geothermal Evolution History of Gaoyou Sag in Subei Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 27(1): 17—18 (in Chinese with English abstract).
- Lundegard, P. D., 1992. Sandstones Porosity Loss: A Big Picture View of the Importance of Compaction. *Journal*

- of *Sedimentary Petroleum*, 62(2): 250—260.
- Pang, J. M., Cao, B., 2005. Origin and Exploration Practice of E_2d Concealed Oil and Gas Accumulation in Gaoyou Sag. *Offshore Oil*, 25(3): 7—13 (in Chinese with English abstract).
- Ping, H. W., Chen, H. H., 2011. Main Controlling Factors on Oil Inclusion Homogenization Temperature and Their Geological Significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(1): 131—138 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2011.014
- Qian, J., 2001. Oil and Gas Fields Formation and Distribution of Subei Basin—Research Compared to Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 22(3): 12—16 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. M., Liu, Y. R., Fu, Q., 2006. Sequence Stratigraphy and Sedimentary Evolution of Upper Cretaceous-Tertiary in Northern Jiangsu Basin. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Salman, B., Lander, R. H., Bonnell, L., 2002. Anomalously High Porosity and Permeability in Deeply Buried Sandstone Reservoirs; Origin and Predictability. *AAPG Bulletin*, 86(2): 301—328. doi: 10.1306/61EEDABC—173E—11D7—8645000102C1865D
- Tian, J. F., Liu, C. Y., Wang, G. C., et al., 2011. Alkaline Dissolution of Sandstone in the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(1): 103—110 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2011.011
- Yao, H. F., Lin, C. Y., Hou, J. G., et al., 2004. The Pattern of Clay Mineral Transformation and Palaeo-Temperature in North Jiangsu Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(1): 29—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. L., Qin, L. J., Zhang, Z. J., 2008. Depositional Facies, Diagenesis and Their Impact on the Reservoir Quality of Silurian Sandstones from Tazhong Area in Central Tarim Basin, Western China. *Journal of Asian Earth Science*, 33: 42—60.
- Zhang, J. L., Si, X. Q., Liang, J., et al., 2004. Diagenesis of Lacustrine Deltaic Sandstones and Its impact on Reservoir Quality. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 226—233 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, N., Lin, C. M., Zhou, J., et al., 2012. Geochemical Characteristics and Its Geological Significance of the 1st Member of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou Depression of the North Jiangsu Basin. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 269—279 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. L., Zhu, X. M., Zhong, D. K., et al., 2005. Sedimentary Facies and Its Controlling on Subtle Oil and Gas Reservoirs of the Dainan Formation of Paleogene in Gaoyou Sag, Subei Basin. *Journal of Palaeogeography*, 7(2): 207—219 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C. L., Zhu, X. M., 2001. Sedimentary Petrology. Petroleum Industry Press, Beijing, 278—280 (in Chinese).
- Zheng, J. M., Pang, M., 1989. Study on Clastic Diagenesis. China University of Geosciences Press, Wuhan, 74—76 (in Chinese).
- Zhong, G. F., Wu, N. F., 1997. Diagenetic Lithofacies Analysis: A Whole New Approach to Studying Diagenetic Heterogeneity. *Petroleum Exploration and Development*, 24(5): 62—66 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈安定, 2001. 苏北箕状断陷形成的动力学机制. 高校地质学报, 7(4): 408—418.
- 冯增昭, 王英华, 刘焕杰, 等, 1994. 中国沉积学. 北京: 石油工业出版社, 427—480.
- 高丽坤, 林春明, 姚玉来, 等, 2010. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组沉积相及沉积演化. 沉积学报, 28(4): 706—716.
- 李红, 柳益群, 刘林玉, 2006. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长 81 低渗透储层成岩作用. 石油与天然气地质, 27(2): 209—217.
- 李梅, 金爱民, 楼章华, 等, 2010. 高邮凹陷南部真武地区地层水化学特征与油气运聚的关系. 中国石油大学学报(自然科学版), 34(5): 50—56.
- 李亚辉, 2006. 苏北盆地高邮凹陷构造转换带控油机制研究. 石油实验地质, 28(2): 109—112.
- 刘小平, 王俊芳, 李洪波, 2005. 苏北盆地高邮凹陷热演化史研究. 石油天然气学报, 27(1): 17—18.
- 庞金梅, 曹冰, 2005. 高邮凹陷戴南组隐蔽油气藏的成因及勘探实践. 海洋石油, 25(3): 7—13.
- 平宏伟, 陈红汉, 2011. 影响包裹体均一温度的主要控制因素及其地质涵义. 地球科学——中国地质大学学报, 36(1): 131—138.
- 钱基, 2001. 苏北盆地油气田形成与分布——与渤海湾盆地比较研究. 石油学报, 22(3): 12—16.
- 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强, 2006. 苏北盆地上白垩统一第三系层序地层与沉积演化. 北京: 地质出版社.
- 田建锋, 刘池洋, 王桂成, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地上三叠系延长组砂岩的碱性溶蚀作用. 地球科学——中国地质大学学报, 36(1): 103—110.
- 姚合法, 林承焰, 侯建国, 等, 2004. 苏北盆地粘土矿物转化模

式与古地温. 沉积学报, 22(1): 29—35.

张金亮, 司学强, 梁杰, 等, 2004. 陕甘宁盆地庆阳地区长 8 油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响. 沉积学报, 22(2): 226—233.

张妮, 林春明, 周健, 等, 2012. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组一段元素地球化学特征及其地质意义. 地质学报, 86(2): 269—279.

张喜林, 朱筱敏, 钟大康, 等, 2005. 苏北盆地高邮凹陷古近系

戴南组沉积相及其对隐蔽油气藏的控制. 古地理学报, 7(2): 207—219.

赵澄林, 朱筱敏, 2001. 沉积岩石学. 北京: 石油工业出版社, 278—280.

郑浚茂, 庞明, 1989. 碎屑储集岩的成岩作用研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 74—76.

钟广法, 鄢宁芬, 1997. 成岩相分析: 一种全新的成岩非均质性研究方法. 石油勘探与开发, 24(5): 62—66.

《地球科学——中国地质大学学报》2013 年参考文献著录格式

本刊参考文献采用著者—出版年制, 即按作者姓氏的首字母顺序排列. 中文参考文献必须有对应的英文翻译, 文内引用文献必须与文后的参考文献对应. 在一条参考文献中若有 3 个以上作者, 在文内仅列出一个作者, 后面加“et al.”(英文文献)或“等”(中文文献), 若有两个作者, 在文内必须全部列出, 并用“and”(英文文献)或“和”(中文文献)连接; 文内同一位置引用多条文献时, 按出版年从老到新顺序排列. 英文文献中期刊名用斜体表示, 姓用全称, 名用缩写; 如果期刊文献有 doi 号, 请放在每条英文文献的最后. 从 2013 年起, 所有英文文献的文章题目中实词首字母全用大写, 虚词首字母全用小写(句首除外). 示例如下:

(1) 期刊

(文内)……经过几代人几十年对生物地层的潜心研究, 建立了该剖面各门类生物组合, 如牙形石在界线层和早三叠世自下而上划分了 5 个带(张克信等, 1995; Mei *et al.*, 1998; Tong and Yang, 1998), 菊石建立了 3 个带, …… 对应的文献:

Mei, S. L., Zhang, K. X., Wardlaw, B. R., 1998. A Refined Succession of Changhsingian and Griesbachian Neogondolellid Conodonts from the Meishan Section, Candidate of the Global Stratotype Section and Point of the Permian Triassic Boundary. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 143: 213—226.

Tong, J. N., Yang, Y., 1998. Advance in Study of the Lower Triassic Conodonts at Meishan Section, Zhejiang Province. *Chinese Science Bulletin*, 43 (16): 1350—1353.

张克信, 赖旭龙, 丁梅华, 等, 1995. 浙江长兴煤山二叠—三叠系界线层牙形石序列及其全球对比. 地球科学——中国地质大学学报, 20(6): 669—676.

Zhang, K. X., Lai, X. L., Ding, M. H., et al., 1995. Conodont Sequence and Its Global Correlation of Permian-Triassic Boundary in Meishan Section, Changxing, Zhejiang Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(6): 669—676 (in Chinese with English abstract).

(文内)……Mo-W 成矿作用主要出现在石英脉和石英细脉中, 也出现在岩钟顶部和石英脉周围的云英岩中(Burmistrov *et al.*, 1990), …… 对应的文献:

Burmistrov, A. A., Ivanov, V. N., Frolov, A. A., 1990. Structural and Mineralogical Types of Molybdenum-Tungsten Deposits of Central Kazakhstan. *International Geology Review*, 32(1): 92—99. doi: 10.1080/00206819009465758

(2) 专著、译著

(文内)……王尚彦和殷鸿福(2001)对贵州省威宁县哲觉剖面早三叠世卡以头组 57 层至 61 层孢粉进行了研究, 从剖面上所获得的孢粉数量较少, …… 对应的文献:

王尚彦, 殷鸿福, 2001. 滇东黔西陆相二叠纪—三叠纪界线地层研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 88.

Wang, S. Y., Yin, H. F., 2001. Study on Terrestrial Permian-Triassic Boundary in Eastern Yunnan and Western Guizhou. China University of Geosciences Press, Wuhan, 88 (in Chinese).

(3) 论文集中析出文献

(文内)……图 2 为南迦帕尔巴特西南的巴基斯坦喜马拉雅和南迦帕尔巴特地区的反映变质作用和深熔作用的温度—时间图(Searle, 1996), …… 对应的文献:

Searle, M. P., 1996. Cooling History, Erosion, Exhumation, and Kinematics of the Himalaya Karakoram Tibet Orogenic Belt. In: Yin, A., Harrison, T. M., eds., *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge Univ. Press, New York, 37—110.