

doi: 10.3799/dqkx.2010.009

桩海地区下古生界潜山内新一类储层： 硅化岩储层的发现及特征

于正军^{1,2,3}, 许淑梅^{4,5*}, 王金铎², 于建国², 韩文功⁴, 李三忠^{4,5}, 马云⁴

1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

2. 中国石化股份胜利油田分公司物探研究院, 山东东营 257022

3. 中国科学院研究生院, 北京 100083

4. 中国海洋大学地球科学学院, 山东青岛 266100

5. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100

摘要: 通过对研究区下古生界取心井的岩心描述、镜下(包括偏光显微镜和扫描电镜)观察, 并对目的层段声波时差、密度、自然伽马等测井参数进行分析, 发现研究区下古生界硅岩段与原生硅岩的岩电特征明显不同, 本文称之为“硅化岩”, 并总结了硅化岩段的特征。研究区下古生界硅化岩之原岩残留结构清晰、硅岩晶粒自形程度高; 硅化岩段常出现热水矿物萤石、重晶石、黄铁矿、铁方解石、石英等的共生组合, 且次生热水矿物的再次溶蚀特征显著; 硅岩段孔隙极为发育, 不但有角砾间溶洞、溶缝, 次生矿物溶蚀也形成溶洞、裂缝等有效储集空间, 另外, 自形石英晶簇的晶间微孔隙也十分发育; 与碳酸盐岩相比硅化岩段具有极低速度、较低密度特点, 且其分布具有“穿层性”。通过与下古生界原生硅岩特征进行对比, 认为桩海地区下古生界硅化岩为次生成因, 其形成是埋藏溶蚀作用的结果。次生硅化岩为下古生界潜山中一种新的储层类型。这种新储层类型的发现不但对中国东部陆相盆地高成熟探区的油气挖潜具有重要的实际意义, 而且对于进一步丰富硅岩理论、推动硅岩研究进展也具有一定的学术价值。

关键词: (次生)硅化岩; 储层; 下古生界; 岩石学; 桩海地区。

中图分类号: P618.13; X145

文章编号: 1000-2383(2010)01-0087-10

收稿日期: 2009-05-10

A New Type of Reservoir of Paleozoic Buried Hill in Zhuanghai Area: Discovery and Characteristics of Silicified Rock

YU Zheng-jun^{1,2,3}, XU Shu-mei^{4,5*}, WANG Jin-duo², YU Jian-guo², HAN Wen-gong⁴,
LI San-zhong^{4,5}, MA Yun⁴

1. Key Laboratory of Marine Geology & Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257022, China

3. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

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

5. Key Lab of Marine Geosciences and Exploration, Ministry of Education, Qingdao 266100, China

Abstract Based on the core description, microanalysis and processing of the logging data including AC, GR and DEN, a new type of silicalite reservoirs in Paleozoic buried hill in Zhuanghai area is found whose rock-electric properties are very different from those of protogenesis silicalites. Silicalite reservoirs are called silicified rock here and their characteristics are generalized. The structure of primary rock of silicified rock is clear and the idiomorphic degree of quartz crystal is high. Paragenetic hydrothermal mineral assemblage of fluorite, barite, pyrite, ferrocalcite and quartz with secondary characteristic are common in silicified rock layer and the secondary corrosion of these paragenetic hydrothermal minerals is significant. The pore of silicified layer is very developed including not only large solution cavities among breccias and secondary pores by dissolution of the Paragenetic

作者简介: 于正军(1968—), 男, 高级工程师, 从事石油地质研究工作。E-mail: yuzj_789@163.com

* 通讯作者: 许淑梅, E-mail: xsm@ouc.edu.cn

hydrothermal minerals, but also the micro-pores among the idiomorphic quartz crystal druse. The P-wave velocity and the density of silicified rock are much lower than that of the carbonate and the distribution of silicified rock in buried hill is featured with the “cross-layer” characteristic. By comparing with the characteristic of the protogenesis silicalite in Paleozoic buried hill, it is believed that the silicified rock is secondary genesis which resulted from deep buried modification. The secondary silicified rock is a new type of reservoir of Paleozoic buried hill in Zhuanghai area. The discovery of this new kind of reservoirs is not only of value to the high exploration basin, but also of scientific significance to the advance of silicate research.

Key words: (secondary) silicified rock; reservoir; Paleozoic; petrology; Zhuanghai area.

0 引言

桩海地区位于济阳拗陷沾化凹陷北部、渤海湾南部的浅海海域. 区域构造处于渤中拗陷、济阳拗陷、埕子口凸起与渤南凸起等 4 个二级构造单元的交汇处(邹东波等, 2004), 东部紧邻郯庐断裂带, 南部较为接近扬子板块和华北板块的作用边界——胶南造山带, 受中、新生代多期区域构造运动的改造和复式叠加作用影响明显(杨风丽等, 2006; 叶兴树和王伟锋, 2008). 该区下古生界潜山(包括埕岛潜山、埕北 30 潜山和桩西潜山)被埕北、沙南、桩东、渤中等第三纪生油洼陷所分隔(图 1a).

埕岛潜山中上部为下古生界缺失区, 在潜山北部边缘有下古生界分布, 厚度 0~1 500 m. 埕北 20 断层以西“二台阶潜山”和埕北 30 潜山下古生界厚度在 100~1 000 m 之间. 桩西潜山南部古生界残留厚度最大, 在 500~2 000 m 之间. 桩西潜山北部 T_g 界面(为中生界与古生界地震反射界面)埋深最大, 古生界厚 0~900 m(图 1). 研究区下古生界下寒武统为紫红色页岩夹灰色灰岩、白云岩、鲕粒灰岩, 与太古界为不整合或断层接触; 中寒武统上部为灰色鲕粒灰岩, 下部为灰绿色页岩、紫红色砂质页岩; 上寒武统为灰色灰岩、竹叶状灰岩、白云岩夹泥灰岩及灰质泥岩. 下奥陶统为灰白色中细晶白云岩, 与上寒武统为连续沉积; 中奥陶统为灰色灰岩、豹皮灰岩, 顶部为泥质白云岩、泥质灰岩, 缺失上奥陶统.

储层是形成碳酸盐岩油气田的关键因素. 碳酸盐最常见的储层类型包括生物礁、颗粒滩、白云岩和风化壳等 4 大类. 桩海地区乃至整个济阳拗陷下古生界生物礁和颗粒滩的生物灰岩和颗粒灰岩岩性致密, 次生孔隙不发育(图 2), 不能作为有效储层, 风化壳是其主要储层类型(图 3), 除了风化壳储层外, “潜山内幕储层”也比较发育, 很多井中不但出现距风化壳 150~2 00 m 的钻具放空和泥浆漏失, 远离风化壳 400~1 000 m 深度区间钻具放空和泥浆漏失现象仍比较常见(图 3). 深部溶蚀作用及深埋藏

溶蚀孔隙的发现充实了潜山内幕储层的内容(钱一雄等, 2006; 许淑梅等, 2007). 本研究在桩海地区下古生界潜山还发现了一类新的储集性极好的储层——硅化岩储层. 硅化岩储层的发现拓展了潜山内幕储层的勘探思路, 并进一步拓展了潜山勘探空

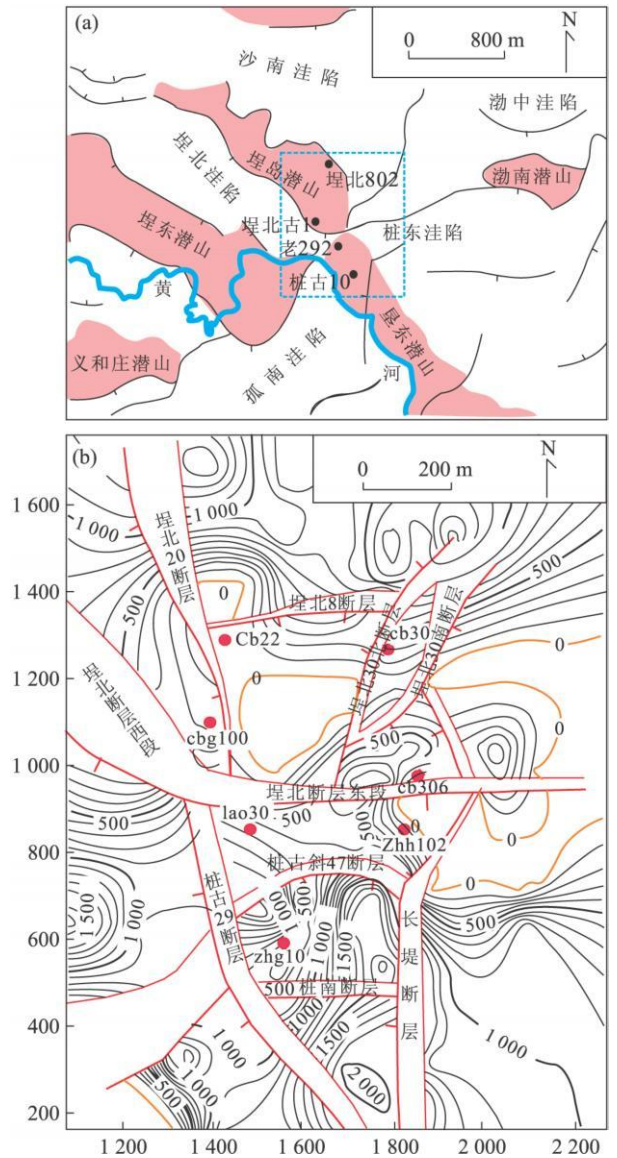


图 1 研究区构造位置(a)及古生界残留厚度图(b)
Fig. 1 Tectonic location of the research area (a) and Paleozoic residual thickness (b)
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

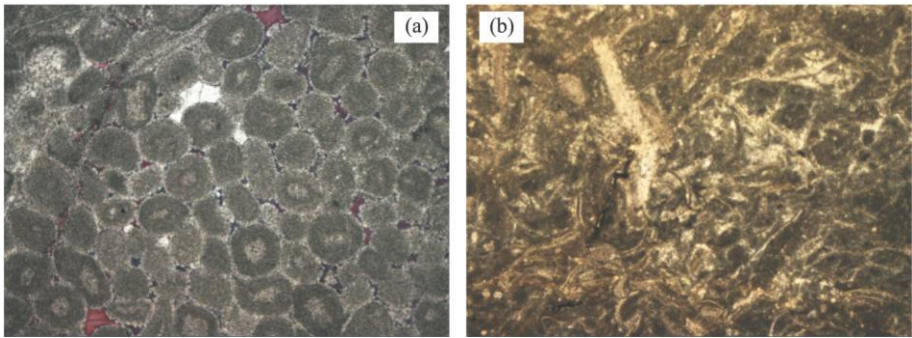


图 2 桩海地区下古生界致密鲕粒白云岩(a)和生屑灰岩(b)

Fig.2 Paleozoic compact ooidal dolomite (a) and bioclastic limestone (b)

a. 桩古 17 井 4 550 m 亮晶鲕粒白云岩, 一期胶结物微细晶方解石已发生白云石化; 二期胶结物为粗晶方解石, 岩性致密, 干层; b. 桩古 6 井 3 593.53 m 生物泥亮晶灰岩, 岩性致密, 干层, 5×(—)

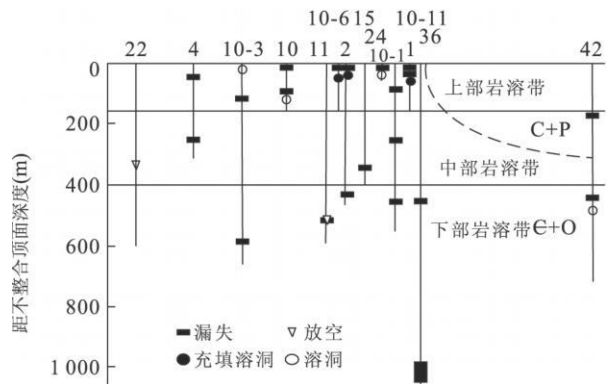


图 3 桩西下古生界潜山漏失和放空统计 (据徐国盛, 2001; 图中横向所列的所有井均为桩古字号)

Fig.3 Count of leakage loss and emptying of buried hill in Zhuangxi area

间. 具有良好储集能力的硅化岩的发现无论对碳酸盐岩潜山储层非均质性成因解释、还是对中国东部多期叠合盆地潜山油气的进一步挖潜均具有重要意义. 从理论上讲, 硅化岩储层的发现及研究对进一步丰富硅岩的相关理论, 建立后生硅岩形成与潜山储层改造之间的关系, 推动硅岩研究进展具有重要的学术价值.

碳酸盐岩中的硅岩层普遍存在. 华北地区、华南地区、西北地区及西南地区的下古生界均有硅岩层产出 (王东安, 1994; 崔春龙等, 1995; 楚泽涵等, 1996; 李胜荣和高振敏, 1996; 高长林和何将启, 1999; 赵国连等, 2001; 冯增昭等, 2004; 吕炳全等, 2004; 孙立新等, 2004; 孙省利等, 2004). 这些硅岩夹层岩性致密、孔隙不发育, 没有有效储集空间, 分布层位稳定, 主要分布在早寒武世和晚奥陶世, 多与页岩、泥岩等黑色岩系呈薄韵律层状或条带状产出, 一般作为怪源岩出现. 主要由结晶程度不一的 α -石

英 (低温石英) 组成, 大多数石英颗粒在 0.03 ~ 0.1 mm 之间, 呈隐晶或半隐晶的胶粒状、海绵状连生体和微细结晶的半自形晶状聚集体, 有些仍保留着玉髓特有的放射状或束状结晶形态. 已有研究普遍认为下古生界硅岩为“原生”成因, 并把它作为致密层看待 (王东安, 1994; 徐樟有和张国杰, 2001; 吕炳全等, 2004), 不具有储集意义. 笔者在研究区若干口井的下古生界均发现具有良好储集能力的硅岩层段. 这些具有良好储集能力的硅岩在岩电特征和储集性等方面明显不同于“原生”硅岩. 本文主要对桩海地区具极好储集能力的硅岩的岩—电和物性特征进行讨论.

2 硅化岩储层的岩—电特征

通过对研究区下古生界取心井的岩心观察描述、镜下 (包括偏光显微镜和扫描电镜) 鉴定, 并对声波时差、密度、自然伽马等测井参数进行分析, 总结出桩海地区下古生界潜山硅化岩层的特征并概括如下:

(1) 原岩的残留结构保存较好, 新生硅化岩晶粒的自形程度高. 埕北古 1、埕北古 100 和埕北古 5 井为埕岛潜山主体西南部的 3 口主要探井. 3 口井的下古生界厚度均不超过 100 m, 主要为下奥陶统白云质灰岩和灰质白云岩. 由于强烈的岩溶作用, 形成典型的深部溶蚀岩溶角砾岩 (图 4). 这些岩溶角砾岩的主要特征是普遍发生硅化作用: 角砾发生不完全硅化, 砾间多为硅质填隙或胶结, 也发现少量泥质填隙, 致使该区较薄的下古生界几乎全部发生硅化, 形成硅化岩层段. 桩西潜山也出现典型的硅化层段. 单偏光镜下硅化角砾岩的角砾状结构清晰 (图 4a),

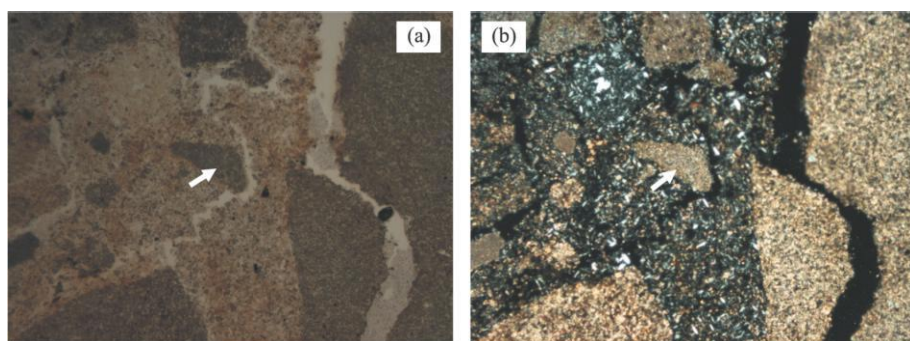


图 4 桩古 10 井 3 593.36 m 处岩溶角砾岩

Fig. 4 Karst breccia in the well Zhuanggu 10 of 3 593.36 m
角砾成分为泥晶灰岩, 硅质和泥质填隙, 裂缝、溶孔发育, 5×(±)

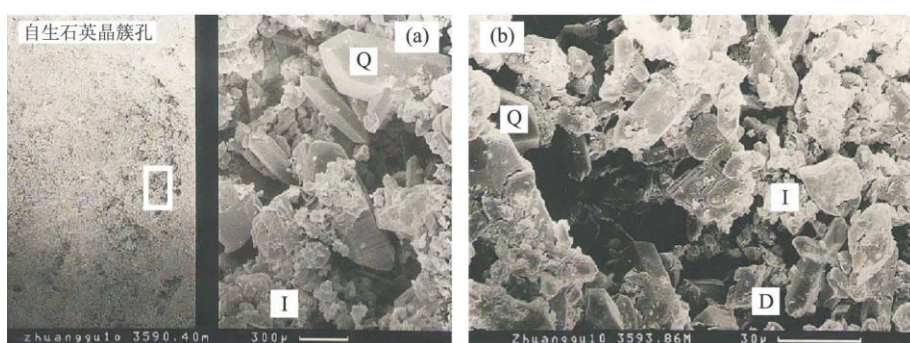


图 5 桩古 10 井硅化层段中次生石英晶簇(扫描电镜照片)

Fig. 5 Secondary drusy quartz in the well Zhuanggu 10 (stereoscan photograph)

a. 硅化层段的自生石英晶簇; b. 硅化泥岩中微孔隙及白云石的微溶孔; Q. 石英; I. 伊利石; D. 白云石

正交偏光镜下可见大量的硅质填隙或胶结, 硅化特征明显(图 4b).

进一步对硅化层段的岩性进行显微观察, 发现硅化层段中的石英晶粒自形程度高, 晶形发育良好, 呈典型的六方柱状晶形, 而并非由非晶态的硅质组成. 自生石英晶簇间的孔隙度很高, 一般在 12%~24%之间, 最高达 37.9%, 储集空间为微孔隙, 微孔大小一般在 2~5 μm 之间, 含少量伊利石等粘土矿物(图 5). 研究区下古生界岩溶角砾岩之原岩的残留结构保存较好, 新生硅岩晶粒的自形程度很高充分表明其次生特征. 本文称这类在物性上明显不同于“原生”硅岩, 并具有典型次生特征硅岩为次生“硅化岩”.

(2)“奇异”次生热水矿物: 包括萤石、重晶石、铁方解石、白云石、黄铁矿等共生组合的出现及其后的溶蚀现象是深部热水岩溶作用的典型标志(李红中等, 2009). 次生热水矿物出现的层段硅化作用特别典型, 次生矿物的再次溶蚀现象也很普遍. 这样的层段恰是储层极为发育的层段, 可作为良好的储集空间(图 6). 黄铁矿、石英、萤石、重晶石、异型白云石

等次生热水矿物在埕岛潜山西南部的埕北古 5 井、埕北古 100 井、埕北古 1 井区及桩西潜山的桩古 10 井区马家沟组灰岩洞缝中皆有发现. 黄铁矿呈半自形或莓状, 多分布在溶洞内壁; 铁方解石主要充填在裂缝中, 茜素红染色后呈暗紫红色; 萤石在单偏光下为低突起, 解理发育, 在正交偏光下为全消光, 岩心中多呈浅紫色、无色的自形一半自形晶粒状充填在 50 mm×100 mm 大型溶洞中, 也可产出在扩溶的高角度构造缝及溶洞中. 重晶石呈板状晶形, 正高突起, 中等—完全解理, 干涉色较低. 这些次生热水矿物的再次溶蚀也特别典型, 沿溶蚀孔洞壁见第三系轻质油充填(图 6). 凡出现石英、萤石、重晶石、黄铁矿、铁方解石等次生热水矿物交代的层位, 溶洞特别发育, 并见良好的油气显示.

(3)凡是硅化岩出现的层段次生孔隙极为发育, 孔隙度很高. 与作为烃源岩和致密层出现的原生硅岩不同, 研究区下古生界硅化岩孔隙极为发育, 具有高孔隙度特征. 硅化层段不但角砾间溶洞、溶缝发育, 而且重晶石、石英、白云石、萤石等次生矿物溶蚀形成的较大、较多的溶洞、裂缝及扩溶缝也可作为有

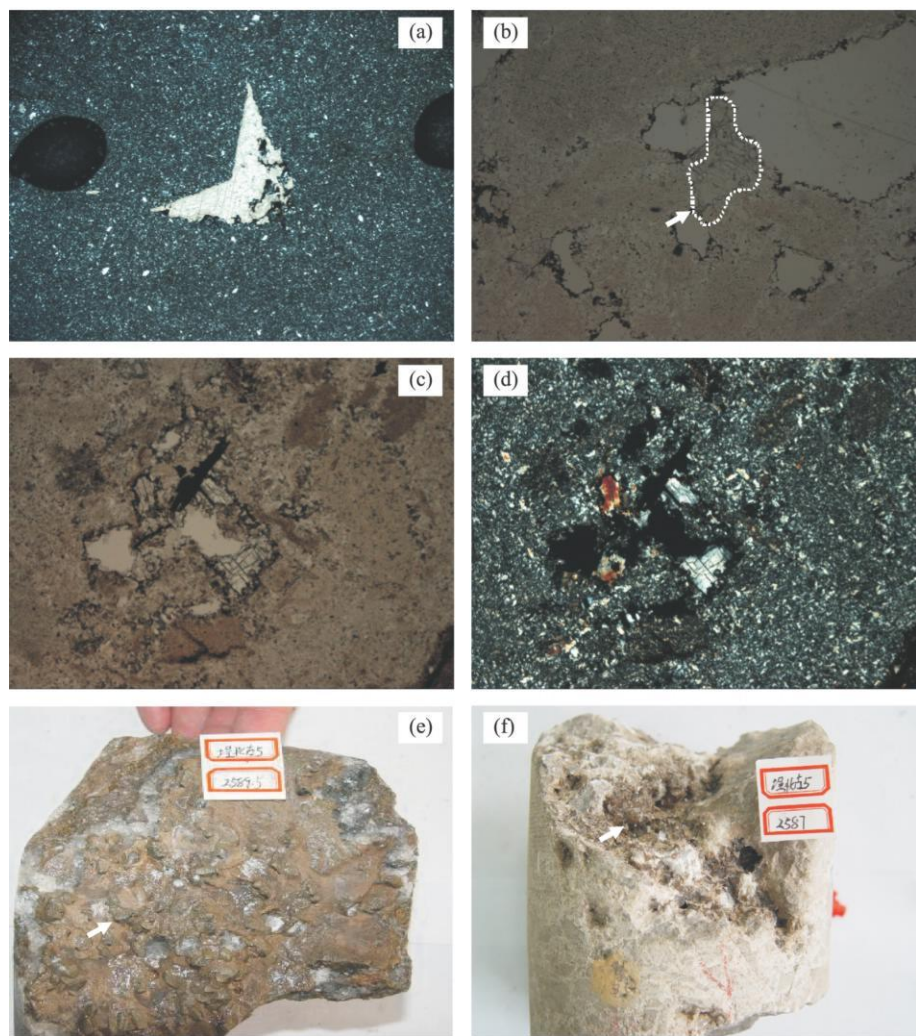


图 6 次生热水矿物白云石、萤石、重晶石、黄铁矿等的特征

Fig. 6 Secondary hot water minerals characters of dolomite, fluorite, barite and pyrite

a. 桩古 10 井 3 597.0 m 硅化岩中自生白云石的港湾状溶蚀, 溶蚀孔隙被有机质充填, 2.5 $\times$ (+); b. 桩古 10 井 3 594.6 m 硅化角砾岩中次生溶洞发育, 见萤石, 油斑沿溶洞壁分布, 5 $\times$ (-); c. d. 桩古 10 井 3 594.6 m 硅化角砾岩的次生溶孔发育, 见重晶石和油斑, 5 $\times$ c. (-), d. (+); e. 埕北古 5 井 2 587.0 m 硅化角砾岩中的莓状黄铁矿, 岩心照片; f. 埕北古 5 井 2 588.0 m 硅化角砾岩中的晶簇状萤石, 岩心照片

效的储集空间(图 7), 其次, 次生自形石英晶簇的晶间微孔隙也极为发育, 微孔隙大小在 2~5 μm 之间(图 5). 硅化层段极为发育的桩古 10 井、埕北古 100 井、埕北古 1 井中孔隙度达 15%左右, 最高达 36%, 岩层的储地比高于 90%, 均为 I 级储层发育层段, 孔隙被第三系轻质油充注.

(4)与下古生界碳酸盐岩相比, 硅化岩具有极低速度、较低密度特征. 一般认为下古生界碳酸盐岩中的原生硅岩层岩性致密、密度较大、声波时差值也相对较低, 其速度一般远高于碳酸盐岩中的泥岩夹层; 岩石的物性也较差, 孔隙度、渗透率均较低, 不具备有效的储集空间. 下面进一步对硅化岩段电性特征进行分析.

从埕北古 100 井和桩古 10 井的下古生界不同岩性段(包括硅化岩段、泥岩段、致密白云岩段和孔隙发育的碳酸盐岩段)声波时差—密度和自然伽玛—密度交汇图(图 8)可以看出, 与高速的致密白云岩段(其声波时差值最低)相比, 硅化岩段的声波时差值较高, 速度接近泥岩速度甚至低于泥岩速度, 而硅化岩段的密度一般与致密白云岩段相当甚至略低. 这些特征表明, 次生硅化岩层段明显不同于原生硅岩(致密的原生硅岩密度大, 速度极低, 声波时差很高), 其次反应硅化岩的孔隙极为发育, 导致其速度降低, 密度减小.

将研究区多口井下古生界硅化岩段的声波时差、自然伽玛、密度等电性特征进行对比(图 9), 进

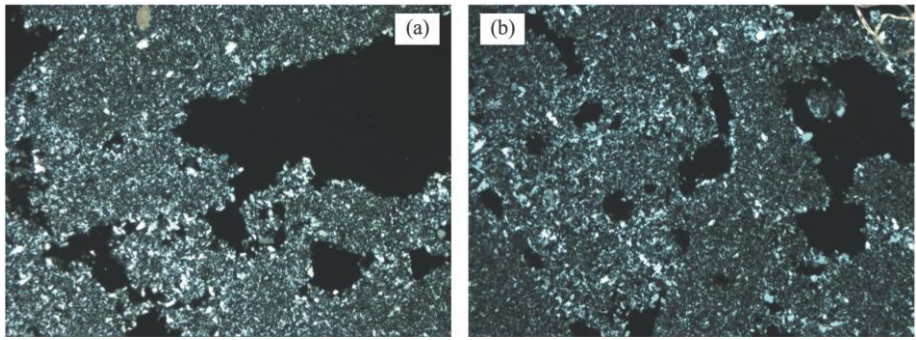


图 7 硅化岩中极为发育的溶孔

Fig. 7 Very developed solution pore in silicified rock

a. 桩古 10 井 3 594. 60 m 硅化角砾岩, 次生溶孔极发育, 洞壁见油斑, 5× (+); b. 桩古 10 井 3 596. 05 m 次生硅化岩, 溶缝—溶洞发育, 被萤石、方解石半充填, 5× (+)

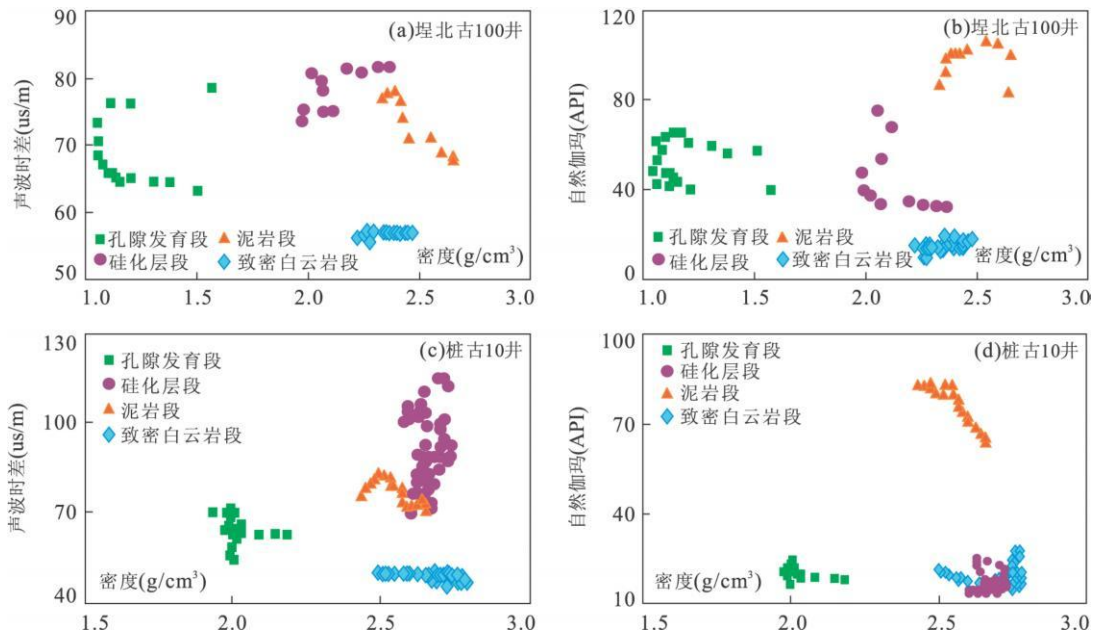


图 8 研究区下古生界不同岩性声波时差—密度(a, c)和自然伽玛—密度(b, d)交汇图

Fig. 8 AC-DEN cross-plot (a, c) and GR-DEN cross-plot (b, d) of Paleozoic different lithologic characters in research area

a. 埕北古 100 井声波时差—密度交汇图; b. 埕北古 100 井自然伽玛—密度交汇图; c. 桩古 10 井声波时差—密度交汇图; d. 桩古 10 井自然伽玛—密度交汇图

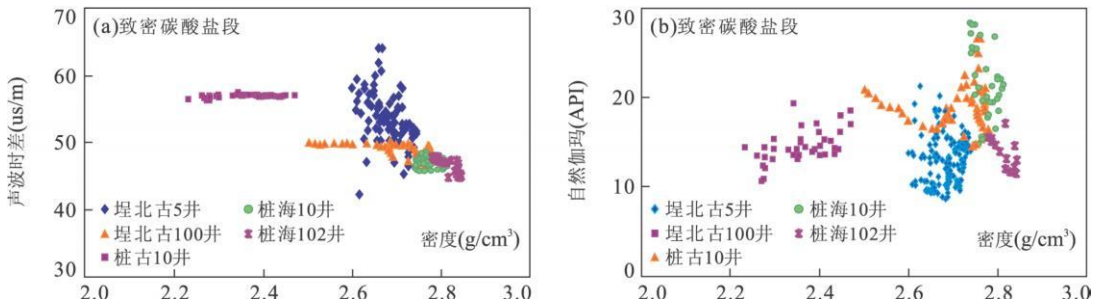


图 9 研究区多口井下古生界致密灰岩段声波时差—密度(a)、自然伽玛—密度交汇图(b)

Fig. 9 AC-DEN cross-plot (a) and GR-DEN cross-plot (b) of Paleozoic compact limestone in research area

一步发现硅化岩段的出现并非单个井内的偶然现象,而是具有一定的普遍性。埕北古5井、埕北古100井、桩古10井、桩海10井、桩海102井等均有低速硅化岩段的出现,其声波时差较高,并在相对稳定的范围内变动($45 \sim 60 \mu\text{s}/\text{m}$),密度较低,主体在 $2.6 \sim 2.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间波动,自然伽玛值也在比较狭窄的范围内变化($10 \sim 22 \text{ API}$);致密灰岩段的声波时差较低,在很小的范围内变动($45 \sim 60 \mu\text{s}/\text{m}$),密度与硅化层段差别不大,自然伽玛值也在非常狭窄的范围内波动($10 \sim 25 \text{ API}$)。硅化岩段这些特性表明,研究区不同潜山区块低速硅化岩的共性及普遍存在性。

3 硅化岩低速体储层的次生性

硅化岩的原岩残留结构清晰、新生硅岩晶粒的较高自形程度、“奇异”热水矿物萤石、重晶石、黄铁矿、铁方解石、石英等共生组合的出现及溶蚀特征、硅化岩层段极为发育的溶蚀孔洞以及与碳酸盐岩相比硅化岩的低速度、较低密度等特征均表明研究区下古生界硅化岩不同于原生硅岩的次生特征。

普遍存在的石英交代充填物指示了酸性环境的存在。硅质可能来源于上覆第三系砂岩成岩作用过程中释放的沉积物“压释水”,其中蒙脱石转变为伊利石可提供大量的孔隙水,而砂质沉积物受到压力作用时,长石、石英颗粒因压溶一部分硅质析出,发生碳酸岩盐的硅质交代作用。已有研究认为陆屑沉积盆地内碎屑沉积物成岩作用过程中释放出的硅质在向低压区运移时可作为低压区碎屑沉积物的胶结物,盆地深部释放的硅质对浅部(低压区)沉积岩的物性有明显影响(Stanton, 1977; Fisher and Land, 1986; Dove, 1994; Lynch, 1996; 邱隆伟等, 2002),如墨西哥湾盆地中渐新世 Frio 砂岩中石英胶结物沉淀的硅质来源于其下深部中新世地层,深部中新世泥岩层发生的蒙皂石向伊利石转化反应产生的硅质在垂向上通过远距离迁移,足以造成上部砂岩的硅质胶结和石英碎屑的次生加大(Land *et al.*, 1997; Lynch *et al.*, 1997; Williams *et al.*, 1997)。对于具有多期叠合盆地性质的济阳拗陷(李丕龙等, 2003),其潜山断块上覆有巨厚第三纪沉积物。盆地碎屑沉积物成岩期释放的富含硅质的酸性压释水(包括碎屑沉积物的间隙水、结晶水和结构水)对成岩作用极为敏感的碳酸盐岩具有较强的溶蚀及改造作用(Longman, 1980; Mooni and Druckman,

1981; Mazzullo and Harris, 1992; Saller *et al.*, 1994; 兰光志和江同文, 1995; 郭建华, 1996; 黄尚瑜和宋焕荣, 1997; 刘家铎等, 1999; Locks, 1999; 夏日元和唐健生, 2000; 章贵松和郑聪斌, 2000; 黄思静和侯中健, 2001; 魏喜等, 2004; 陈学时等, 2004)。次生硅化岩储层的形成是埋藏溶蚀作用的结果,研究区下古生界潜山在老第三纪定型和埋藏期的埋藏溶蚀作用是形成潜山硅化岩储层的重要地质过程。

硅化岩储层是桩海地区下古生界潜山中一类新的重要的储集体类型,桩西潜山和埕岛潜山下古生界硅化岩储层均比较发育。与下古生界原生硅岩层主要分布在早寒武世和晚奥陶世,具有稳定的分布层位特征不同,硅化岩储层在研究区下古生界的赋存层位具有“穿层性”,多出现在与第三系洼陷呈断层接触的下古生界潜山断块周缘,大型潜山中心地带很少出现硅化岩层段,硅化程度自潜山断块中心向边缘也具有逐渐增强的渐变过渡特征。桩海地区下古生界硅化层段的上述分布特征表明,含硅质酸性流体的运移可能是在潜山定型后沿沟通洼陷与潜山凸起的边界断层进行的。

4 结语

原生硅岩在下古生界分布层位稳定、岩性致密、与页岩、泥岩等黑色岩系呈薄韵律层状产出,呈隐晶或半隐晶的胶粒状、海绵状连生体,且一般作为烃源岩或致密层出现,而硅化岩孔隙发育,是下古生界潜山中一类新的储集体类型。桩海地区下古生界硅化岩原岩残留结构清晰、新生硅岩晶粒的较高自形程度、出现“奇异”热水矿物萤石、重晶石、黄铁矿、铁方解石、石英等共生组合,这些次生热水矿物的再次溶蚀特征显著,硅化岩层段的孔隙极为发育,不但有角砾间溶洞、溶缝,而且重晶石、石英、白云石、萤石等次生矿物溶蚀形成的较大较多的溶洞、裂缝及扩溶缝也可作为有效的储集空间,后生自形石英晶簇的晶间微孔隙也十分发育,与碳酸盐岩相比具有低速度、较低密度特点,且其分布具“穿层性”。硅化岩段的上述特征均表明其次生成因。次生硅化岩储层的形成是埋藏溶蚀作用的结果,研究区下古生界潜山在老第三纪定型和埋藏期的埋藏溶蚀作用是形成潜山硅化岩储层的重要地质过程。

另文将专门对硅化岩在潜山中的这种空间分布规律进行探讨,并提出能够合理解释硅化岩储层空间分布规律的成因模式。当然,对于次生硅化作用发

生的条件、硅化作用机理及硅化岩低速体储层的原位识别方法的探索等也需要进一步开展工作。

References

- Chen, X. S., Yi, W. X., Lu, W. Z., 2004. The paleokarst reservoirs of oil/gas fields in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 244—253 (in Chinese with English abstract).
- Chu, Z. H., Liu, Z. P., Chen, F., 1996. Theoretical and experimental investigation on the relationship between dolomizing degree of carbonate and the velocity of elastic wave. *Journal of The University of Petroleum, China*, 20(5): 25—30 (in Chinese with English abstract).
- Cui, C. L., Zeng, Y. F., Duan, L. L., et al., 1995. The sedimentology of siliceous rocks of Hercynian Indo China in Changning Menglian belt, western Yunnan, China. *Journal of Southwest China Institute of Technology*, 10(4): 44—53 (in Chinese with English abstract).
- Dove, P. M., 1994. The dissolution kinetics of quartz in sodium chloride solutions at 25 °C to 300 °C. *American Journal of Science*, 294: 665—712.
- Feng, Z. Z., Peng, Y. M., Jin, Z. K., et al., 2004. Lithofacies Paleogeography of the Cambrian and Ordovician. Petroleum Industry Press Beijing (in Chinese).
- Fisher, R. S., Land, L. S., 1986. Diagenetic history of Eocene Wilcox sandstones, South-Central Texas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(4): 551—561. doi: 10.1016/0016-7037(86)90104-3
- Gao, C. L., He, J. Q., 1999. Geochemical feature and origin of silicalite in north of Dabashan Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(3): 246—250 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J. H., 1996. On the palaeokarst of Lower Palaeozoic Group, Tarbei and Tarzhong regions of Tarim. *Carsologica Sinica*, 15(3): 207—216 (in Chinese with English abstract).
- Huang S. J., Hou, Z. J., 2001. Spatio-temporal variation of subsurface porosity and permeability and its influential factors. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(2): 224—232 (in Chinese with English abstract).
- Huang S. Y., Song H. R., 1997. Deep karstification of gas-oil reservoir. *Carsologica Sinica*, 16(3): 189—198 (in Chinese with English abstract).
- Lan, G. Z., Jiang, T. W., 1995. Palaeokarstification of gas-oil reservoir. Petroleum Industry Press Beijing, 58—63 (in Chinese).
- Land, L. S., Mack, L. E., Milliken, K. L., 1997. Burial metamorphism of argillaceous sediment, South Texas Gulf of Mexico Sedimentary basin: a re-examination. *Geological Society of America Bulletin*, 109(1): 2—15.
- Li, H. Z., Yang, Z. J., Zhou, Y. Z., et al., 2009. Microfabric characteristics of cherts of Bafangshan-Erlihe Pb-Zn Ore field in the western Qinling orogen. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 299—306 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. L., Zhang, S. W., Wang, Y. S., et al., 2003. Multiplex buried-hill exploration genesis and pool-forming—a case study on Jiyang depression. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Li, S. R., Gao, Z. M., 1996. Silicalite of hydrothermal origin in the Lower Cambrian black rock series of South China. *Acta Mineralogica Sinica*, 16(4): 416—421 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. D., Meng, W. B., Zhou, W., et al., 1999. Palaeoepigenetic dissolution of Chengdao-Shenghai buried hill. *Journal of Palaeogeography*, 1(4): 79—85 (in Chinese with English abstract).
- Locks, R. G., 1999. Paleocave carbonate reservoir: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications. *AAPG Bull.*, 83(11): 1795—1834. doi: 10.1306/E4FD426F-1732-11D7-8645000102C1865D
- Longman, M. W., 1980. Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environment. *AAPG Bull.*, 64(4): 461—487.
- Lü, B. Q., Wang, H. G., Hu, W. S., et al., 2004. Relationship between Paleozoic upwelling facies and hydrocarbon in southeastern marginal Yangtze block. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(4): 29—35 (in Chinese with English abstract).
- Lynch, F. I., 1996. Mineral/water interaction, fluid flow and Frio sandstone diagenesis: evidence from the rocks. *AAPG Bull.*, 80(4): 486—504. doi: 10.1306/64ED8822-1724-11D7-8645000102C1865D
- Lynch, F. I., Mack, L. E., Land, L. S., 1997. Burial diagenesis of illite-smectite in shales and the origins of authigenic quartz and secondary porosity in sandstones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(7): 1995—2006. doi: 10.1016/S0016-7037(97)00066-5
- Mazzullo, S. J., Harris, P. M., 1992. Mesogenetic dissolution, its role in porosity development in carbonate reservoirs. *AAPG Bull.*, 76(5): 607—620. doi: 10.1306/BDFF8880-1718-11D7-8645000102C1865D
- Moore, C. H., Druckman, Y., 1981. Buried diagenesis and porosity evolution, Upper Jurassic Smackover, Arkansas and Louisiana. *AAPG Bull.*, 65(4): 597—627.
- Qian, Y. X., Chen, Y., Chen, Q. L., et al., 2006. General

- characteristics of burial dissolution for Ordovician carbonate reservoirs in the northwest of Tazhong area. *Acta Petrolei. Sinica*, 27(3): 47—52 (in Chinese with English abstract).
- Qiu L. W., Jiang Z. X., Chen W. X., et al., 2002. A new type of secondary porosity-quartz dissolution porosity. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 621—627 (in Chinese with English abstract).
- Saller, H. A., Budd, A. D., Harris, M. P., 1994. Unconformities and porosity development in carbonate strata: ideas from a Hedberg conference. *AAPG Bull.*, 78(6): 857—872. doi: 10.1306/A25FE3C9-171B-11D7-8645000102C1865D
- Stanton, C. D., 1977. Secondary porosity in sandstones of the Wilcox (Eocene), Kames County, Texas. *Transaction of Gulf Coast Association of Geological Societies*, 27(2): 197—207.
- Sun, L. X., Wan, X. Q., Jia, J. C., et al., 2004. Sedimentary environments of siliceous rock in the western Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 78(3): 380—389 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. L., Chen, J. F., Liu, W. H., et al., 2004. Subtle reservoir exploration in the slope-break belt of the North Nanyang depression. *Petroleum Exploration and Development*, 31(3): 45—48 (in Chinese with English abstract).
- Wang D. A., 1994. The geochemical feature of siliceous rocks since Late Proterozoic in the Yangtze platform and their genesis. *Scientia Geologica Sinica*, 29(1): 41—54 (in Chinese with English abstract).
- Wei X., Zhu Y. J., Zhao G. C., et al., 2004. Reservoir space characteristics and evolution of the Palaeozoic reservoir rocks in Shuguang buried hills Liaohe fault basin. *Oil & Gas Geology*, 24(4): 467—471 (in Chinese with English abstract).
- Williams L. G., Hervig, R. L., Bjørlykke, K., 1997. New evidence for the origin of quartz cements in hydrocarbon reservoirs revealed by oxygen isotope microanalysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(12): 2529—2538. doi: 10.1016/S0016-7037(97)00111-7
- Xia R. Y., Tang, J. S., 2000. The developed and evaluated patterns of Ordovician palaeo-karst in the Huanghua depression. *Petroleum Exploration and Development*, 31(1): 51—53 (in Chinese with English abstract).
- Xu G. S., 2001. Research on characteristics of buried-hill reservoirs and its distribution in Jiyang depression. Reports of Buried-hill Conference, Qingdao (in Chinese).
- Xu S. M., Wang J. D., Yu J. G., et al., 2007. Paleozoic buried modification feature of and meaning of reservoir in Zhuanghai area of Jiyang depression. *Oil Geophysical Prospecting*, 42(5): 591—596 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Y., Zhang, G. J., 2001. Divisional method and characteristic analysis of impermeable barrier layers in carbonate rock formation. *Journal of The University of Petroleum, China*, 25(1): 46—52 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F. L., Chang, B. T., Yu K. P., et al., 2006. Relationship between dynamic fields and hydrocarbon accumulation in buried hill of Zhuanghai area. *Acta Petrolei. Sinica*, 27(4): 50—58 (in Chinese with English abstract).
- Ye X. S., Wang, W. F., 2008. Plate subduction constrains on the formation of Jiyang depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(2): 235—242 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G. S., Zheng, C. B., 2000. Compaction released water karst and natural gas migration, acculation, and reservoir formation. *Carsologica Sinica*, 19(3): 199—205 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. L., Zhao, C. L., Wang, D. A., et al., 2001. Origins and environment types of chert in western Zhejiang and southern Anhui from Late Sinian to Early Cambrian. *Geoscience*, 15(4): 370—376 (in Chinese with English abstract).
- Zou D. B., Wu, S. G., Liu G., et al., 2004. The features of the NNE trending faults and its implication for hydrocarbon in the Zhunghai area Bohaiwan basin. *Natural Gas Geoscience*, 15(5): 503—507 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈学时, 易万霞, 卢文忠, 2004. 中国油气田古岩溶与油气储层. 沉积学报, 22(2): 244—253.
- 楚泽涵, 刘祝平, 陈丰, 1996. 弹性波速度与碳酸盐岩白云石化程度的考察和研究. 石油大学学报(自然科学版), 20(5): 25—30.
- 崔春龙, 曾允孚, 段丽兰, 等, 1995. 昌宁—孟连带海西印支期硅岩沉积学. 西南工学院学报, 10(4): 44—53.
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等, 2004. 中国寒武纪和奥陶纪岩相古地理. 北京: 石油工业出版社.
- 高长林, 何将启, 1999. 北大巴山硅质岩的地球化学特征及其成因. 地球科学——中国地质大学学报, 24(3): 246—250.
- 郭建华, 1996. 塔北、塔中地区下古生界深埋藏古岩溶. 中国岩溶, 15(3): 207—216.
- 黄尚瑜, 宋焕荣, 1997. 油气储层的深岩溶作用. 中国岩溶,

- 16(3): 189—198.
- 黄思静, 侯中健, 2001. 地下孔隙率和渗透率在空间和时间上的变化及影响因素. 沉积学报, 19(2): 224—232.
- 兰光志, 江同文, 1995. 古岩溶与油气储层. 北京: 石油工业出版社, 58—63.
- 李红中, 杨志军, 周永章, 等, 2009. 秦岭造山带西段八方山—二里河 Pb-Zn 矿区硅质岩的微组构分析及其意义. 地球科学——中国地质大学学报, 34(2): 299—306.
- 李丕龙, 张善文, 王永诗, 等, 2003. 多样性潜山成因、成藏与勘探——以济阳坳陷为例. 北京: 石油工业出版社, 1—120.
- 李胜荣, 高振敏, 1996. 华南下寒武统黑色岩系中的热水成因硅质岩. 矿物学报, 16(4): 416—421.
- 刘家铎, 孟万斌, 周文, 等, 1999. 埕岛—胜海潜山带的古岩溶作用. 古地理学报, 1(4): 79—85.
- 吕炳全, 王红罡, 胡望水, 等, 2004. 扬子地块东南古生代上升流沉积相及其与烃源岩的关系. 海洋地质与第四纪地质, 24(4): 29—35.
- 钱一雄, 陈跃, 陈强路, 等, 2006. 塔中西北部奥陶系碳酸盐岩埋藏溶蚀作用. 石油学报, 27(3): 47—52.
- 邱隆伟, 姜在兴, 陈文学, 等, 2002. 一种新的储层孔隙成因类型—石英溶解型次生孔隙. 沉积学报, 20(4): 621—627.
- 孙立新, 万晓樵, 贾建称, 等, 2004. 雅鲁藏布江缝合带中部硅岩地球化学特征及构造环境制约. 地质学报, 78(3): 380—389.
- 孙省利, 陈践发, 刘文汇, 等, 2004. 塔里木盆地寒武统硅质岩地球化学特征及其形成环境. 石油勘探与开发, 31(3): 45—48.
- 王东安, 1994. 扬子地台晚元古代以来硅岩地球化学特征及其成因. 地质科学, 29(1): 41—54.
- 魏喜, 祝永军, 赵国春, 等, 2004. 辽河断陷曙光古潜山古生代储层储集空间特征及演化. 石油与天然气地质, 24(4): 467—471.
- 夏日元, 唐健生, 2000. 黄骅坳陷奥陶系古岩溶发育演化模式. 石油勘探与开发, 31(1): 51—53.
- 徐国盛, 2001. 济阳坳陷古潜山储集体发育特征及分布规律研究. 青岛: 2001 年潜山会议报告.
- 徐樟有, 张国杰, 2001. 碳酸盐岩储层中非渗透性隔层的识别及分类评价. 石油大学学报(自然科学版), 25(1): 46—52.
- 许淑梅, 王金铎, 于建国, 等, 2007. 济阳坳陷桩海地区下古生界深埋藏溶蚀特征及储集意义. 石油地球物理勘探, 42(5): 591—596.
- 杨风丽, 常波涛, 于开平, 等, 2006. 桩海潜山场—势效应与油气聚集的关系. 石油学报, 27(4): 50—58.
- 叶兴树, 王伟锋, 2008. 板块俯冲对济阳坳陷形成的制约. 地球科学——中国地质大学学报, 33(2): 235—242.
- 章贵松, 郑聪斌, 2000. 压释水岩溶与天然气的运聚成藏. 中国岩溶, 19(3): 199—205.
- 赵国连, 赵澄林, 王东安, 等, 2001. 皖南浙西晚震旦世至早寒武世硅岩物源与环境类型初探. 现代地质, 15(4): 370—376.
- 邹东波, 吴时国, 刘刚, 等, 2004. 渤海湾盆地桩海地区 NNE 向断层性质及其对油气的影响. 天然气地球科学, 15(5): 503—507.