

塔里木盆地寒武系膏盐岩对盐下白云岩储层的影响

刘丽红, 高永进, 王丹丹, 白忠凯, 张远银, 韩 森

(中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100083)

摘 要: 塔里木盆地寒武系盐下白云岩作为重要的战略接替区已成为近年来的研究热点。前人主要集中对寒武系白云岩的形成机制和膏盐岩的封盖作用进行了研究, 而关于膏盐岩对白云岩储层的影响则少有涉及。本文总结了塔里木盆地寒武系白云岩储层特征, 同时探讨了膏盐岩对白云岩储层的影响机制, 以期对寒武系盐下白云岩勘探提供指导。塔里木盆地寒武系白云岩主要分为结晶白云岩和微生物白云岩两大类, 其中结晶白云岩又可分为泥微晶白云岩、晶粒白云岩和颗粒白云岩, 微生物白云岩又可分为凝块石白云岩、叠层石白云岩和泡沫绵石白云岩。受膏盐岩影响的白云岩储层类型可划分为膏溶孔型白云岩储层、晶间孔型白云岩储层和溶蚀孔型白云岩储层。蒸发潮坪环境中, 膏盐岩的沉淀有利于克服白云石化的 Mg^{2+} 的动力学障碍而形成白云岩, 同时, 微生物作用下 SO_4^{2-} 的还原会促进白云石的沉淀。膏盐岩对白云岩储层孔隙的影响主要体现在: 含硬石膏结核泥粉晶白云岩易于形成膏溶孔型白云岩储层; 膏盐层较高的热导率有利于倒退溶蚀作用的发生; 近地表低温条件下硫酸盐的溶解有利于白云石的沉淀; 热化学硫酸盐还原作用形成酸性气体有利于深埋溶蚀作用, 形成溶蚀孔型白云岩储层。

关键词: 塔里木盆地; 寒武系; 盐下白云岩; 膏盐岩; 热化学硫酸盐还原作用

中图分类号: P588.24⁺7; P618.130.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)01-0109-12

The impact of gypsum salt rock on Cambrian subsalt dolomite reservoir in Tarim Basin

LIU Li-hong, GAO Yong-jin, WANG Dan-dan, BAI Zhong-kai, ZHANG Yuan-yin and HAN Miao

(Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: The Cambrian dolomite in Tarim Basin has become focus in recent years as the significant strategic area. Previous studies have mainly focused on the dolomitization mechanism and the capping effect of salt rock. However, studies of the impact of salt rock on the dolomitization and reservoir formation are very rare. In this study, the authors summarized the dolomite reservoir characteristics of Cambrian Tarim basin and discussed the impact of salt rock on the subsalt dolomite. The Cambrian dolomite in Tarim basin can be classified into two major types, i. e. crystalline dolomite and microbial dolomite. The crystalline dolomite can further be divided into dolomicrite, crystal dolomite and granular dolomite. The microbial dolomite can be divided into thrombolites dolomite, stromatolite dolomite and foamite dolomite. Influenced by salt rock, the dolomite reservoir can be classified into anhydrite dissolved pores type reservoir, intercrystalline pores type reservoir and intercrystalline dissolved pores type reservoir. The salt rock mainly exerted impact on the dolomitization process and the formation of reservoir pores. The precipitation of gypsum and anhydrite in evaporated flat settings increased the Mg^{2+}/Ca^{2+} ratio in the formation fluid, which was favorable for the dolomitization. Besides, the reduction of SO_4^{2-} influenced by microbial action promoted

收稿日期: 2020-09-01; 授受日期: 2020-12-15; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(41802173); 地质调查项目(DD20190106, DD20190708, DD20190090)

作者简介: 刘丽红(1982-), 女, 工程师, 研究方向油气储层地质学, E-mail: liulihong713@163.com; 通讯作者: 王丹丹(1982-), 女, 高级工程师, 主要从事油气调查和石油地质综合研究工作, E-mail: ddwangen@163.com。

the precipitation of dolomite. In the aspect of impact on reservoir, the anhydrite dissolved pores were normally good reservoir space, the relative high thermal conductivity was favorable for the retrograde solution of dolomite, the dissolution of sulfate in near-surface condition was favorable for the precipitation of dolomite, and thermochemical sulfate reduction produced sour gas to form dissolved pores.

Key words: Tarim Basin; Cambrian; subsalt dolomite; gypsum salt rock; thermochemical sulfate reduction

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41802173); Project of China Geological Survey (DD20190106, DD20190708, DD20190090)

盐下白云岩是指盐岩覆盖下的白云岩。所谓盐岩,是一种纯化学成因的岩石,由蒸发海水或湖泊作用沉淀形成,主要由钾、钠、钙、镁的卤化物及硫酸盐矿物组成。膏盐岩是盐岩的一种,是由石膏和硬石膏组成的盐岩,常分布在盐岩的下部。在干旱的塔里木盆地,海水蒸发浓缩沉积了巨厚层蒸发岩,由于蒸发岩通常具有极低的孔隙度、渗透率和很强的塑性流动性,即使经历构造挤压及成岩改造也能保持良好的封闭能力,因此可以成为有效盖层(金之钧等, 2010)。据全球大型油气田盖层统计,泥页岩分布面积占 80% 以上,但是所封盖的石油储量仅占全球石油储量的 22%,而膏盐岩分布面积虽然仅占 8%,却封盖了全球总油气储量的 55%,表明膏盐岩盖层对油气聚集与保存具有重要意义(金之均等, 2006)。塔里木盆地寒武系盖层主要分为盐湖相盖层、膏云坪相盖层和泥云坪相盖层(杜金虎等, 2016),本文主要介绍膏盐岩对盐下白云岩储层的影响。

与膏盐岩有关的油气资源潜力巨大,全球 30.6% 的碳酸盐岩油气田位于膏盐岩之下,储层占碳酸盐岩总储量的 46.2% (刘朝全等, 2016; 穆龙新, 2017)。据统计,与膏盐岩有关的油气田主要分布在北半球(聂鸿宇等, 2018),中东是碳酸盐岩-膏盐岩共生组合蕴藏油气田数最多的地区,储量占中东碳酸盐岩总储量的 40% (胡安平等, 2019)。塔里木盆地寒武系盐下白云岩作为重要的储量增长点和战略接替区已显示出巨大的勘探潜力和良好的勘探前景,中寒武统膏盐岩“白被子”分布面积大于 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ (郑和荣等, 2007),可以作为有效的区域盖层。然而,继中深 1 井和中深 5 井获得油气突破以来(王招明等, 2014),一直未取得重大突破,后续钻井接连失利。随着气候条件由潮湿到干旱的逐渐变化,盐下白云岩类型由岛屿白云岩、微生物白云岩逐渐过渡到蒸发白云岩(萨布哈或渗透回流白云岩)(赵文智等, 2018),塔里木盆地寒武系盐下主要发

育蒸发白云岩和微生物白云岩。前人对膏盐岩下白云岩储层特征、形成机理及控制因素进行了较多研究(邵龙义等, 2002; 金振奎等, 2012; 郑剑锋等, 2013; 黄擎宇等, 2013; 胡文瑄等, 2014),然而有关膏盐岩对白云石储层的影响机制研究较少。塔里木盆地寒武系白云岩储层孔隙发育受多种因素控制,如受原始沉积环境、准同生溶蚀作用和热液溶蚀作用等影响(黄擎宇等, 2016),膏盐岩的存在对白云岩储层发育具有哪些影响有待进一步研究。在前人研究基础之上,本文总结了塔里木盆地寒武系白云岩储层特征,并探讨了膏盐层的发育对白云岩储层的影响,以期对盐下白云岩储层勘探提供指导。

1 地质背景

按照中国地质调查局(张君峰等, 2020; Bai Zhongkai *et al.*, 2020)最新划分方案,塔里木盆地可划分为“五隆五坳”构造单元,隆起区主要包括塔中隆起、巴楚隆起、塔东隆起、塔北隆起和柯坪隆起区,钻遇寒武系地层钻井主要位于塔中、巴楚隆起及其以北地区,主要发育的露头剖面包括什艾日克剖面、肖尔布拉克西沟剖面、昆盖阔坦剖面、苏盖特布拉克剖面、金磷矿剖面 and 肖尔布拉克剖面等(图 1)。区内钻遇寒武系地层的钻井包括新苏参 1 井、新柯地 1 井、柯坪 1 井、柯探 1 井、方 1 井、同 1 井、康 2 井、和田 1 井、和 4 井、中探 1 井、塔参 1 井、中深 1 井、中深 5 井等 20 余口井。塔里木盆地寒武系总体表现为“西台东盆”的古地理格局(席斌斌等, 2015),塔里木盆地西北部地区寒武系地层依据膏盐岩的分布可划分为盐下白云岩段(肖尔布拉克组)、下膏盐岩段(吾松格尔组)、盐间云质灰岩段(沙依里克组)、上膏盐岩段(阿瓦塔格组)和盐上白云岩段(丘里塔格组)(黄擎宇等, 2016)(图 2)。膏盐岩的分布以巴楚地区为中心向邻区展布,其中巴楚地区累积厚度可达 120~500 m,塔中地区厚度减薄至 30~140 m(程丽

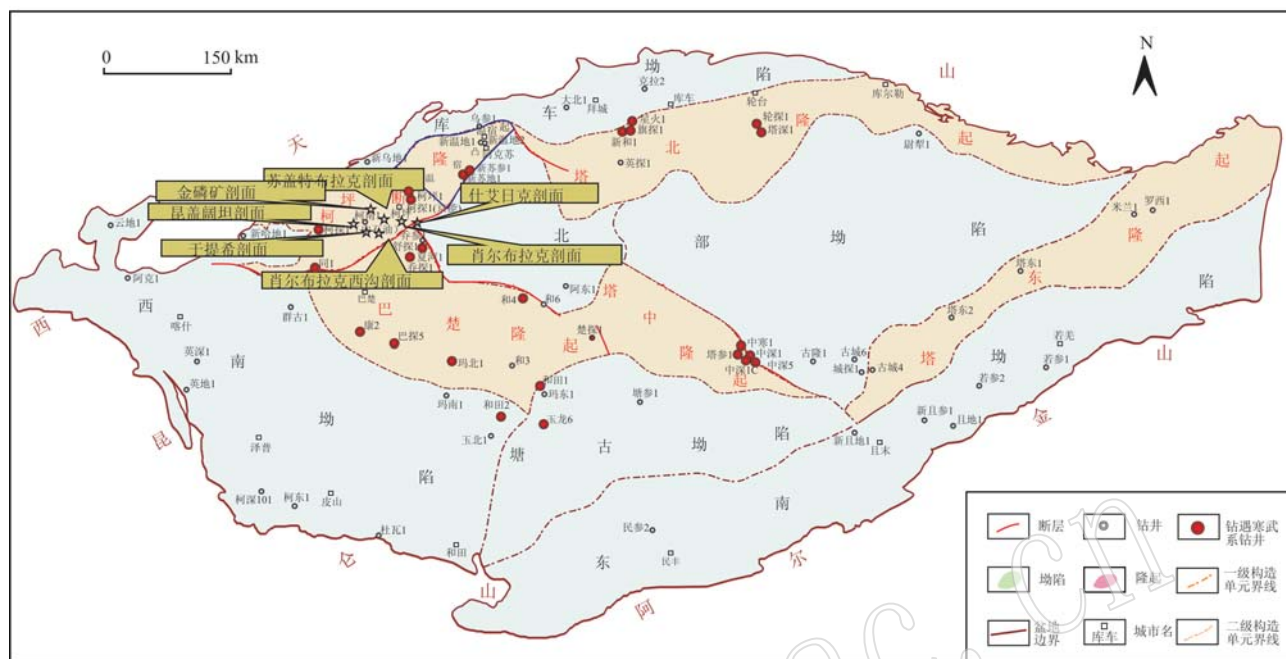


图1 塔里木盆地构造分区及寒武系露头剖面(钻井位置图)(底图引自张君锋等, 2020)

Fig. 1 Cambrian outcrops and well locations in the tectonic map of Tarim Basin (base map after Zhang Junfeng *et al.*, 2020)

娟等, 2020)。膏盐岩的广泛分布表明塔里木盆地在该时期处于干旱-极度干旱的古气候条件(曹自成等, 2020)。

2 碳酸盐岩-膏盐岩组合研究现状

碳酸盐岩-膏岩组合包括以下几种类型: 岛屿白云岩-膏盐岩组合、微生物白云岩-膏盐岩组合(巴西桑托斯盆地)、蒸发白云岩-膏盐岩组合(鄂尔多斯盆地马家沟组中组合)。随着气候条件由潮湿向干旱变迁, 在同生期和准同生期应该依次发育岛屿白云岩、微生物白云岩、蒸发白云岩和膏盐岩(赵文智等, 2018), 但是由于气候变化的不完整性, 在膏盐岩下这3类白云岩并不连续出现(图3), 如四川盆地雷口坡组仅发育微生物白云岩和蒸发白云岩, 缺少潮湿气候条件下的岛屿白云岩, 而灯影组只发育微生物白云岩, 说明气候条件未达到极度干旱条件。鄂尔多斯盆地东南部马家沟组发育蒸发白云岩和少量微生物白云岩, 代表了极度干旱气候条件的间歇性淡化(Hu Anping *et al.*, 2019)。西沙石岛中新统一上新统只发育岛屿白云岩, 说明气候未达到干旱气候条件。

前人对塔里木盆地寒武系白云岩储层进行了大量研究, 不同地区识别出不同类型的白云岩。叶德胜(1992)最初将塔里木盆地北部地区寒武系白云岩划分为藻纹层白云岩、微晶白云岩、颗粒白云岩及结晶白云岩。邵龙义等(2002)根据巴楚地区寒武系白云岩的形态将其划分为泥粉晶白云岩、细晶白云岩、钙质白云岩和砂糖状白云岩。金振奎等(2012)根据白云石晶体大小在塔东地区识别出3种类型的白云岩, 即泥-粉晶白云岩、细晶白云岩和中-粗晶白云岩。胡文瑄等(2014)在塔里木盆地柯坪地区识别出叠层石白云岩和凝块石白云岩两种微生物白云岩类型。黄擎宇等(2016)将巴楚地区寒武系白云岩划分为颗粒白云岩、结晶白云岩和微生物白云岩。在前人研究基础上, 结合现有的观察资料和研究结果, 总结出塔里木盆地寒武系膏盐岩下主要发育微生物白云岩和结晶白云岩两种类型的白云岩, 微生物白云岩又可分为凝块石白云岩、叠层石白云岩和泡沫绵石白云岩。微生物白云岩通常与微生物的活动有关, Vasconcelos等(1995)认为硫酸盐还原菌可以促进原生白云石的沉淀, Warthmann等(2005)认为产甲烷菌也可以诱导产生原生白云石, Hu等(2019)利用嗜盐菌在实验室反应72 h, 生成了与Vasconcelos

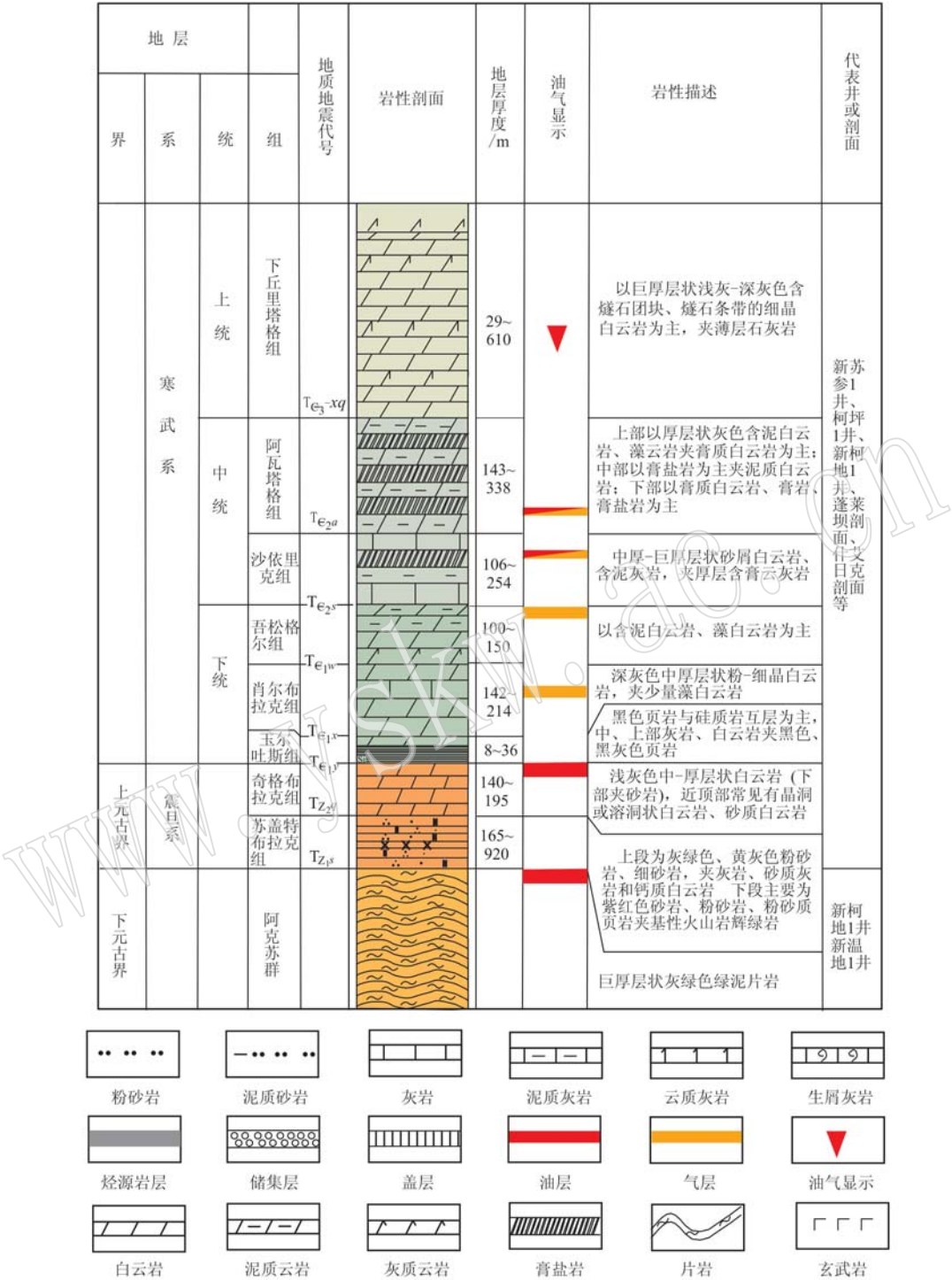


图 2 塔里木盆地西北部寒武系地层柱状图 (张君锋等, 2020)
Fig. 2 Columnar section of Cambrian strata in northeastern Tarim Basin (after Zhang Junfeng *et al.*, 2020)

和 Warthmann 等提到的具有相同结构特征的白云石,说明较高盐度下嗜盐菌的存在可促进白云石的沉淀,形成微生物白云岩,盐度过低则不能形成白云石,说明微生物白云岩形成于相对干旱的气候条件下。随着盐度的进一步增加,已不适宜嗜盐菌的生

长,微生物白云岩不再沉淀 (Hu Anping *et al.*, 2019)。
结晶白云岩主要包括泥微晶白云岩、晶粒白云岩和颗粒白云岩,而颗粒白云岩也主要由泥粉晶构成,少量由细晶构成。前人研究认为,塔里木盆地寒

类型	岩性序列	四川盆地雷口坡组	四川盆地灯影组	鄂尔多斯盆地马家沟组	塔里木盆地肖尔布拉克组	西沙石岛中新统-上新统
膏盐岩						
蒸发白云岩						
微生物白云岩						
岛屿白云岩						

图 3 碳酸盐岩-膏盐岩组合类型(赵文智等, 2018)

Fig. 3 Carbonate-gypsum rock assemblage types (after Zhao Wenzhi *et al.*, 2018)

武系白云岩主要形成于准同生期-浅埋藏期,主要为萨布哈和渗透回流作用下的产物,只有少量的细晶白云岩形成于中晚期埋藏白云石化作用(沈安江等, 2016)。在干旱的气候条件下,即蒸发背景下形成的萨布哈白云岩和渗透回流白云岩,统称为蒸发白云岩。塔里木盆地肖尔布拉克组膏盐岩下发育微生物白云岩和蒸发白云岩,说明气候条件逐渐由半干旱向干旱气候条件转换。

塔里木盆地寒武系储集空间类型包括微生物白云岩格架孔、中-粗晶白云岩的晶间孔、硬石膏溶解形成的铸模孔、深埋溶蚀作用形成的溶蚀扩大孔以及溶蚀垮塌作用形成的角砾间孔,局部地区发育缝合线和裂缝(云露等, 2008; 田雷等, 2015; 黄擎宇等, 2016)。其中,受膏盐岩作用影响的白云岩储层类型可划分为膏溶孔型白云岩储层、晶间孔型白云岩储层和溶蚀孔型白云岩储层 3 大类,本文主要探讨受膏盐岩作用影响的白云岩储层成因。

3 膏盐岩对白云石化作用的影响

3.1 石膏和硬石膏的沉淀促进白云石化作用的发生

膏盐岩对碳酸盐岩储层孔隙的影响体现在白云石化作用、石膏溶蚀作用或膏岩层封盖作用等方面。碳酸盐岩-膏盐岩组合通常发育在海相或陆表海环境,当海水逐渐蒸发浓缩时存在一个矿物沉淀序列,

即首先是 CaCO_3 沉淀,然后是蒸发岩矿物组合 CaSO_4 等沉淀,最后是卤族化合物 KCl 等。在蒸发沉积的早期,以文石形式沉淀的 CaCO_3 和以石膏形式沉淀的 CaSO_4 构成蒸发沉积序列的最主要组成部分。现代海水大多对白云石是过饱和的,蒸发海水环境更有利于发生白云石化作用(Hardie, 1987; Machel, 2004)。由于潮上暴露环境水动力条件弱,长期暴露地表,气候干燥,蒸发作用强烈, Ca^{2+} 逐渐析出,剩余卤水中 Mg/Ca 值逐渐升高,克服白云石化的 Mg^{2+} 的动力学障碍而形成白云岩(Morrow, 1982),即准同生白云岩。沉淀出文石和石膏的蒸发海水具有较高的密度,可以形成有效的水动力系统,为附近的碳酸盐地层发生白云石化运送 Mg^{2+} (黄可等, 2014)。

在现代蒸发海水环境中形成的白云石通常有序度很低,并且 Ca^{2+} 含量较高,构成原白云岩或高钙白云岩(Gaines, 1977; Reeder, 1983),而古代白云石通常有序度很高,且不易溶解,因此,前人认为,白云石的形成会随着时间的推移逐渐发生结构和组分的调整,随着埋藏温度和深度的增加而发生重结晶作用(Hardie, 1987),如塔中地区寒武系中-粗晶白云岩可能为粉-细晶白云岩在热液作用下重结晶作用形成的(赵闯等, 2012)。

3.2 硫酸盐还原作用有利于白云石的沉淀

虽然白云石在海水中是饱和的,但是白云石却不能在海水中直接沉淀,说明在海水中存在白云石沉淀的动力学屏障(黄思静等, 2010)。前人研究认为, SO_4^{2-} 的存在可能会抑制白云石化作用的进行,而硫酸盐还原作用可以消耗 SO_4^{2-} ,有利于白云石的沉淀(Wright, 2000; Wacey, 2003)。如在澳大利亚泻湖沉积物中硫酸盐的浓度极高($>2\ 000\ \text{mg}^{-1}$)(Wright and Wacey, 2004),而嗜硫细菌的存在则可以将硫酸盐还原成 H_2S ,从而移除硫酸根离子增加碱度,造成溶液的 pH 值和碳酸根浓度的上升,这可能就是微生物对白云石化作用的诱导机制。同时,某些嗜氧微生物(Sánchez-Román *et al.*, 2008)和硫氧化细菌(Moreira *et al.*, 2004)同样可以促进白云石沉淀。

塔里木盆地盐下白云岩广泛发育微生物白云岩,下寒武统微生物礁在昆盖阔坦、肖尔布拉克组剖面、苏盖特剖面、什艾日克剖面、金磷矿剖面及于提希剖面均有发育,肖尔布拉克组微生物碳酸盐岩均由白云岩组成,主要的微生物白云岩包括凝块石云

岩、泡沫绵石白云岩、叠层石云岩等,均与微生物的活动有关,同时也与微生物对 SO_4^{2-} 的还原作用有关,因此硫酸盐还原作用可促进白云石沉淀。

4 膏盐岩对白云岩储层孔隙的影响

4.1 膏溶孔型白云岩储层的形成

在蒸发潮坪环境,石膏的沉淀不仅有利于准同生白云石化作用的发生,而且为后来的溶蚀作用奠定了物质基础。与膏盐岩地层相伴生的最常见的孔隙空间类型是膏溶孔,通常出现在潮下或萨布哈环境的泥晶白云岩中。膏溶孔是一种选择性溶蚀孔隙,是由于(硬)石膏结核的选择性溶蚀淋滤而形成的(图4),因而可称作(硬)石膏结核铸模孔,所形成的储层类型即为膏溶孔型白云岩储层。

硬石膏的溶解度是白云石的2087倍,石膏的溶解度是白云石的2200倍(方少仙等,2009)。在表生期大气淡水作用下,硬石膏首先溶解转化成石膏,而石膏可迅速溶解于大气淡水而形成膏溶孔。在硬石膏转化为石膏的过程中,体积通常会增加30%,对围岩产生极大的膨胀力。而石膏溶解后又会释压,这一过程反复进行,在围岩基质中产生裂碎缝,在大气淡水作用中发生扩溶,同时为大气淡水提供运移通道,更进一步促进了溶解作用的进行。因此,在岩心中通常看到含硬石膏结核粉晶白云岩通常较发育膏溶孔和微裂缝,而与之相邻的白云岩地层中仅有微弱的岩溶现象。石膏和硬石膏更多地集中在萨布哈序列的顶部分布,这些硫酸盐的溶解会形成溶蚀垮塌角砾岩并产生大量的孔隙(Loucks and Anderson, 1985)。

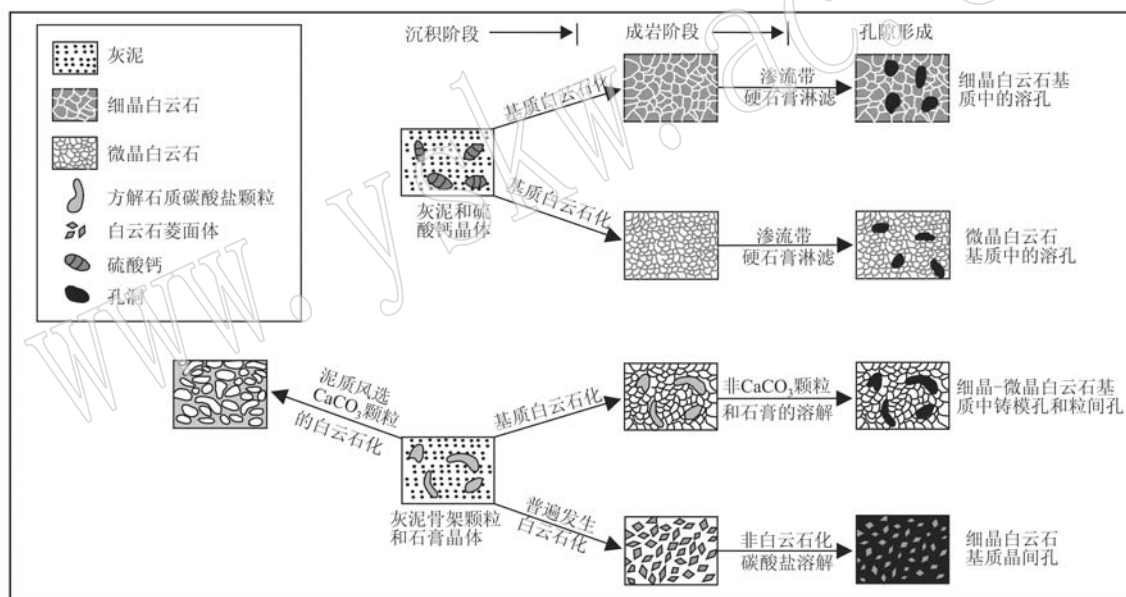


图4 碳酸盐岩储层孔隙系统形成演化过程(Ruzyla and Friedman, 1985)

Fig. 4 Diagenetic evolution in the formation of carbonate pore system (Ruzyla and Friedman, 1985)

4.2 晶间孔型白云岩储层的形成

碳酸盐岩地层常与膏盐岩地层交互出现,主要原因是膏盐岩的沉积代表了蒸发浓缩的沉积环境,而高度浓缩的海水提供 Mg^{2+} 作用于下覆灰岩地层,易于发生白云石化作用,即准同生白云石化作用,而淡水溶蚀作用紧随白云石化作用发生。实际上,淡水回流不仅可以造成白云石化的泥质沉积物溶解,同时可以造成未白云石化的文石、镁方解石或方解石的溶解,使原来呈漂浮状的白云石菱面体演化为晶粒支撑结构,造成晶间孔发育(图4)。同时,大气

淡水的进入还会使原来处于亚稳定状态的白云岩通过重结晶作用而变得稳定,淡水循环的影响是控制萨布哈有关的孔隙形成的重要因素。

含硬石膏结核泥粉晶白云岩中,硬石膏结核的数量和孔径大小往往和基质白云岩的晶体大小成正比,即硬石膏结核数量越多,孔径越大,基质白云岩的晶体越大,晶间孔越发育,构成原生沉积期的孔隙系统。其主要原因是,在干旱蒸发条件下,当海水浓度浓缩至原体积的19%以下时,海水盐度大概为15%~17%,硬石膏开始从海水中沉淀(方少仙等,

2013)。在白云石交代方解石到硬石膏沉淀前的一段时间内,海水的浓度一直保持较高的水平,但是没有达到硬石膏沉淀的极限值,这个时间持续的越长,沉淀的白云石晶体越大,晶间孔越发育。甚至有些高盐度海水在未沉淀硬石膏之前,就已开始淡化,因此,仅生成泥粉晶白云岩到细粉晶白云岩,白云石晶体大小与浓缩海水持续时间长短有关。如果海水不断浓缩至硬石膏沉淀的这个过程持续时间较短,则易于生成含硬石膏结核泥-微晶白云岩。如果硬石膏沉淀时间较长,则在硬石膏沉淀期间,白云石晶体继续沉淀,晶体大小通常较大,可达细粉晶甚至中粗晶结构,晶间孔发育,是原生沉积期的主要孔隙类型,该类白云岩由于发育时间充足,通常有序度较高,形成晶间孔型白云岩储层。

4.3 膏盐岩的封盖作用对白云岩地层的影响

塔里木盆地北部地区在加里东-海西运动中经历了显著的抬升,奥陶系地层受喀斯特作用影响进入表生成岩阶段,形成重要的喀斯特油气藏。然而,奥陶系底部的蓬莱坝组和寒武系地层并未经过喀斯特作用,其埋藏深度抬升将近 1 000 m 的深度(黄思静等, 2010)(图 5),使其深埋藏条件下处于平衡状态的高温流体由于地层温度的降低而变得不饱和,碳酸盐矿物发生溶解形成次生孔隙,这就是所谓的倒退溶解模式(黄思静等, 2009)。

由于膏盐岩的热导率高,导热性强,有利于地层温度的降低,盐下及盐间白云岩地层容易发生倒退

溶蚀作用。同时,由于膏盐层的封盖能力强,形成超压系统,在一定程度上减缓了压实作用的发生,有利于盐下地层孔隙的保存。

4.4 硫酸盐溶解对白云石溶解的影响

前以述及, SO_4^{2-} 的移除有助于白云石的沉淀,那么 SO_4^{2-} 的加入(硫酸盐的溶解)是否有利于白云石的溶解呢? 答案是肯定的。黄思静等(2012)通过实验模拟发现,在近地表低温条件下,硫酸盐的加入有利于白云石的溶解。模拟实验在地表温度 25℃、pH 值为 4.18 的酸性介质条件下进行,两组实验溶液中分别加入和未加入 600 mg/L 的 CaSO_4 ,结果表明,未加入溶解 CaSO_4 的溶液中,白云石的溶解效果很差,而加入溶解 CaSO_4 的白云石溶解效果显著,说明在近地表的温压条件下,溶解 CaSO_4 的加入有利于白云石的溶解。然而,这种影响作用随着温度的增加逐渐降低,当温度超过 75℃、压力大于 15 MPa 时,硬石膏的存在阻碍白云石的溶解,而且随着温度和压力的升高,这种阻碍作用更加明显(黄思静等, 1996)。

4.5 热化学硫酸盐还原作用对储层孔隙的影响(溶蚀孔型白云岩储层的形成)

热化学硫酸盐还原作用(TSR)是指烃类与硫酸盐岩在热动力条件驱动下发生的热化学还原反应(张水昌等, 2008)。尽管 TSR 发生的最低温度尚存争议,但现有研究表明,TSR 反应的最低温度范围为 100~140℃(Machel, 1998),因此,当必要的反应物如硫酸盐、有机质存在的条件下,只要温度达到这一范围即可发生 TSR 反应(Machel *et al.*, 2001)。塔里木盆地寒武纪地层沉积以后经历快速深埋,在寒武纪末期埋藏深度即已达到 3 000 m,埋藏地温超过 120℃(图 5),达到了 TSR 所需的温度条件。在加里东-海西运动中经历短暂抬升后一直处于持续埋深的过程,当前深度为最大埋深,因此,塔里木盆地寒武纪可能仍在发生着 TSR 作用,由已有钻井产出的天然气组分中具有较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的 CO_2 即可能来自 TSR 反应(Cai *et al.*, 2001)。

TSR 反应的另一必要条件就是溶解的 CaSO_4 ,岳长涛等(2003)通过实验证实硬石膏固体与甲烷气体在 650℃下才能反应,这样高的温度在地层中很难达到。尽管塔里木盆地发育巨厚层的膏盐岩,但是这些膏盐岩只有溶于水才具有化学反应活性(刘丽红等, 2019),因此,反应是否发生取决于地层中的残余水。地下卤水主要与蒸发岩有关,来源于蒸发岩

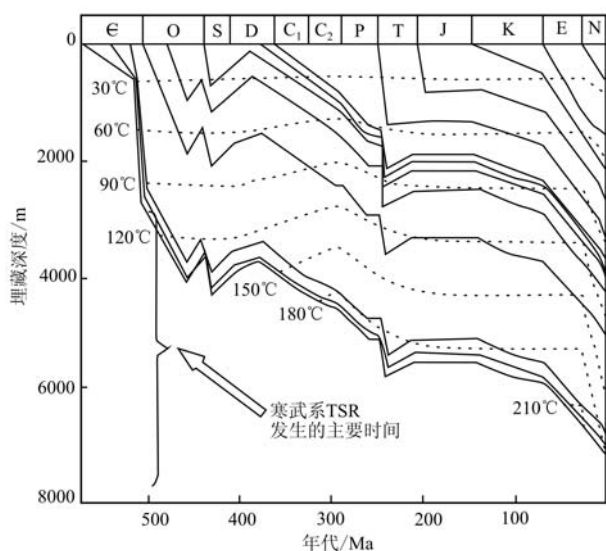


图 5 塔里木盆地 TC1 井埋藏史图(据 Cai *et al.*, 2001)

Fig. 5 The burial history of TC1 well in Tarim Basin
(after Cai *et al.*, 2001)

间流体或者蒸发岩在地下溶解产生的流体。在膏盐岩地层沉积时,由于周期性海平面变化,受大气淡水影响,膏盐岩部分溶解下渗到下覆寒武系地层中使其具有高矿化度的孔隙水。大约74%以上的油田水为咸水或卤水,且大多数比海水咸(Stoessell and Moore, 1983)。钻井及地下水分析资料表明,塔里木盆地北部地区地层水矿化度很高(一般>100 000 mg/L),为CaCl₂型矿化水(叶德胜, 1994)。当地层快速埋深到一定温度条件时,孔隙水中的CaSO₄与下部玉尔吐斯生成的烃类气体发生TSR反应,产生H₂S和CO₂。塔中地区中深1井和中深1C井下寒武统天然气的H₂S含量分别为3.25%~5.02%和8.15%~8.20%(张纪智等, 2017),即可能为热化学硫酸盐还原作用产生。H₂S和CO₂是典型的酸性气体,溶于水后生成H⁺,被认为是深埋溶蚀作用发生的主要溶解介质(朱光有等, 2005; 黄思静等, 2009),碳酸盐岩在酸性介质条件下发生溶蚀会形成次生孔隙。

5 结论

(1) 塔里木盆地寒武系盐下白云岩主要包括微生物白云岩和结晶白云岩两大类,其中微生物白云岩又可细分为凝块石白云岩、叠层石白云岩和泡沫绵石白云岩,与微生物活动有关,为半干旱气候条件下形成。而结晶白云岩主要为泥微晶白云岩、晶粒白云岩和颗粒白云岩,为干旱气候条件下形成的白云岩,塔里木盆地肖尔布拉克组膏盐岩下发育微生物白云岩和结晶白云岩,说明气候条件逐渐由半干旱向干旱气候条件转换。

(2) 塔里木盆地寒武系与膏盐岩有关的储层类型包括膏溶孔型白云岩储层、晶间孔型白云岩储层和溶蚀孔型白云岩储层。膏溶孔型白云岩储层主要分布在向上变浅的层序顶部,晶间孔型储层主要受蒸发环境中淡水循环以及重结晶作用的影响,而溶蚀孔型白云岩储层主要受热化学硫酸盐还原作用控制。

(3) 膏盐岩对白云石化作用的影响主要体现在蒸发环境下硬石膏的沉淀提高了下覆地层的Mg²⁺/Ca²⁺值,从而克服了白云石化的Mg²⁺的动力学障碍而形成白云岩。同时,微生物作用下SO₄²⁻的还原也有利于白云石的沉淀。

(4) 膏盐岩对白云岩储层孔隙的影响主要体现

在以下几方面:含硬石膏结核泥粉晶白云岩易于形成膏溶孔型白云岩储层;膏盐层较高的热导率有利于倒退溶蚀作用的发生;近地表低温条件下硫酸盐的溶解有利于白云石的沉淀;热化学硫酸盐还原作用形成酸性气体有利于深埋溶蚀作用,形成溶蚀孔型白云岩储层。

(5) 膏盐岩不仅可以作为油气储层有效的盖层,而且对白云岩储层具有建设性作用,因此盐下白云岩通常可以成为有利的储层,具备良好的油气勘探前景。

致谢 本文在成文过程中得到了北京大学刘波研究员和石开波博士的指导,审稿专家给论文提出了许多建设性的意见,在此一并致谢!

References

- Bai Zhongkai, Cheng Minghua, Chen Cheng, *et al.* 2020. Distribution features of the Nanhua-Sinian rifts and their significance to hydrocarbon accumulation in the Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(2): 501~515.
- Cai C F, Hu W S and Worden R H. 2001. Thermochemical sulphate reduction in Cambro-Ordovician carbonates in Central Tarim [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 18: 729~741.
- Cao Zicheng, You Donghua, Qi Lixin, *et al.* 2020. New insights of the genesis of ultra-deep dolomite reservoirs in Well TS1, Tarim Basin: Evidence from in situ carbon and oxygen isotope analysis [J]. *Natural Gas Geoscience*, 31(7): 915~922 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Lijuan, Li Zhong, Liu Jiaqing, *et al.* 2020. Diagenesis and physical properties of subsalt dolomite reservoirs of the Cambrian, Bachu-Tazhong areas, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 41(2): 316~327 (in Chinese with English abstract).
- Du Jinhu and Pan Wenqing. 2016. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(3): 327~339 (in Chinese with English abstract).
- Fang Shaoxian, He Jiang, Hou Fanghao, *et al.* 2009. Reservoir pore space types and evolution in M55 to M51 submember of Majiagou Formation of middle Ordovician in central gasfield area of Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2 425~2 441 (in Chinese with English abstract).

- Fang Shaoxian, Hou Fanghao, He Jiang, *et al.* 2013. Carbonate Diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 159 (in Chinese with English abstract).
- Gaines A M. 1977. Protodolomite redefined[J]. *Sediment. Petrol.*, 47: 543~546.
- Hardie L A. 1987. Dolomitization: A critical view of some current views [J]. *Sediment. Petrol.*, 57: 166~183.
- Hu Anping, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, *et al.* 2019. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 46(5): 916~928(in Chinese with English abstract).
- Hu Anping, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, *et al.* 2019. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system[J]. *Petrol. Explor. Develop.*, 46(5): 969~982.
- Hu Wenxuan, Zhu Jingquan, Wang Xiaolin, *et al.* 2014. Characteristics, origin and geological implications of the Cambrian microbial dolomite in Keping area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 35(6): 860~869(in Chinese with English abstract).
- Huang Keke, Hu Zuwei, Li Xiaoning, *et al.* 2014. Forming mechanism and dolomitization model of Triassic crystalline dolomite in Northeast Sichuan Basin, China[J]. *Chengdu University of Technology: Sci. & Technol. Ed.*, 41(5): 612~624 (in Chinese with English abstract).
- Huang Qingyu, Hu Suyun, Pan Wenqing, *et al.* 2016. Characteristics and controlling factors of the Cambrian carbonate reservoir in Bachu area, Tarim Basin, NW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 27(6): 982~993(in Chinese with English abstract).
- Huang Qingyu, Liu Di, Ye Ning, *et al.* 2013. Reservoir characteristics and diagenesis of the Cambrian dolomite in Tarim basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 37(6): 63~74 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Cheng Xinyi, Zhao Jie, *et al.* 2012. Test on the dolomite dissolution under subaerial temperature and pressure[J]. *Carsologica Sinica*, 31(4): 349~359(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Gong Yechao and Huang Keke. 2010. The influence of burial history on carbonate dissolution and precipitation—A case study from Feixianguan Formation of Triassic, NE Sichuan and Ordovician carbonate of northern Tarim Basin[J]. *Advance in Earth Sciences*, 25(4): 381~389(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Huang Keke, Zhang Xuehua, *et al.* 2009. Chemical thermodynamics foundation of retrograde solubility for carbonate: Solution media related to CO₂[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Sci. & Technol. Ed.*, 36(5): 457~464(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Yang Junjie, Zhang Wenzheng, *et al.* 1996. Effects of gypsum (or anhydrite) on dissolution of dolomite under different temperatures and pressures of epigenesis and burial diagenesis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(1): 103~109(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhenkui, Yang Youxing, Yu Kuanhong, *et al.* 2012. Genetic types of dolostones in the Cambrian, eastern Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 14(6): 747~756 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhijun, Long Shengxiang, Zhou Yan, *et al.* 2006. A study on the distribution of saline-deposit in southern China[J]. *Oil & Gas Geology*, 27(5): 571~583 (in Chinese).
- Jin Zhijun, Zhou Yan, Yun Jinbiao, *et al.* 2010. Distribution of gypsum-salt cap rocks and near-term hydrocarbon exploration targets in the marine sequences of China[J]. *Oil & Gas Geology*, 31(6): 715~724(in Chinese with English abstract).
- Liu Chaoquan and Jiang Xuefeng. 2016. The Development Report on Oil and Gas Industry in Domestic and Overseas in 2016[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Liu Lihong, Wang Chunlian, Du Zhili, *et al.* 2019. Genesis of pyrite in Ordovician Majiagou Formation carbonate in southeastern Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(5): 705~716(in Chinese with English abstract).
- Loucks R G and Anderson J H. 1985. Depositional facies, diagenetic terranes, and porosity development in lower Ordovician Ellenburger dolomite, Puckett field, west Texas[A]. Roehl P O and Choquette P W. Carbonate Petroleum Reservoirs[C]. Springer-Verlag, New York, 19~37.
- Machel H G. 1998. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 1408C: Discussion[J]. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 82: 1870~1873.
- Machel H G. 2001. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings[J]. *Sedimentary Geology*, 140: 143~175.
- Machel H G. 2004. Conceptual models of dolomitization: a critical reappraisal[A]. Braithwaite C, Rizzi G and Darke G. The Geometry and Petrogenesis of Dolomite Hydrocarbon Reservoirs [C]. Geol. Soc. London Sp. Publ., 235: 7~63.
- Moreira N F, Walter L M, Vasconcelos C, *et al.* 2004. Role of sulfide oxidation in dolomitization: Sediment and pore-water geochemistry of a modern hypersaline lagoon system[J]. *Geology*, 32: 701~704.
- Morrow D W. 1982. Diagenesis 1. Dolomite-part 1: the chemistry of

- dolomitization and dolomite precipitation[J]. *Geosci. Can.*, 9: 5~13.
- Mu Longxin. 2017. Global Petroleum Exploration and Development Situation and Oil Company Dynamics (2017) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Nie Hongyu, He Youbin, Luo Jinxiong, *et al.* 2018. The depositional environment of gypsum-salt rocks of Longwangmiao Formation and its influence on the reservoir diagenesis in Southern Sichuan Basin[J]. *Henan Science*, 36 (1): 100~106 (in Chinese with English abstract).
- Reeder R J. 1983. Crystal chemistry of the rhombohedral carbonates[A]. Reeder R J. Carbonates: Mineralogy and Chemistry. Reviews Mineralogy[C]. Mineralogical Society of America, Washington D. C., 11: 1~47.
- Ruzyla K and Friedman G M. 1985. Factors controlling porosity in dolomite reservoirs of the Ordovician Red River Formation, Cabin Creek field, Montana [A]. Roehl P O and Choquette P W. Carbonate Petroleum Reservoirs[C]. Springer-Verlag, New York, 39~58.
- Sánchez-Román M, Vasconcelos C and Schmid T. 2008. Aerobic microbial dolomite at the nanometer scale: Implications for the geologic record[J]. *Geology*, 36(11): 879~882.
- Shao Longyi, He Hong, Peng Suping, *et al.* 2002. Types and origin of dolostones of the Cambrian and Ordovician of Bachu uplift area in Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 4(2): 19~30 (in Chinese with English abstract).
- Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, *et al.* 2016. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoirs in Lower-Middle Cambrian, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(3): 340~349 (in Chinese with English abstract).
- Stoessell R K and Moore C H. 1983. Chemical constraints and origins of four groups of Gulf Coast reservoir fluids[J]. *AAPG Bull.*, 67: 896~906.
- Tian Lei, Cui Haifeng, Chen Yongquan, *et al.* 2015. The distribution characteristics and prospecting significance of the Middle and Lower Cambrian dolomite reservoir in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(Suppl. 1): 130~138 (in Chinese).
- Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, *et al.* 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures[J]. *Nature*, 377(6546): 220~222.
- Wacey D. 2003. Microbial Mediation of Dolomite Formation: Geochemical Investigation in the Coorong Region of South Australia[D]. University of Oxford.
- Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, *et al.* 2014. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 Well in Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 19(2): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Warthmann R, Vasconcelos C, Sass H, *et al.* 2005. *Desulfovibrio brasiliensis* sp. nov., a moderate halophilic sulfate-reducing bacterium from Lagoa Vermelha (Brazil) mediating dolomite formation[J]. *Extremophiles*, 9(3): 255~261.
- Wright D T and Wacey D. 2004. Sedimentary dolomite: A reality check [A]. Braithwaite C J R, Rizzi G and Darke G. The Geometry and Petrogenesis of Dolomite Hydrocarbon Reservoirs [C]. Geological Society (London), Special Publications, 235: 65~74.
- Wright D T. 2000. Benthic microbial communities and dolomite formation in marine and lacustrine environments-a new dolomite model [A]. Glenn C R, Lucas J and Prevot-Lucas L. Marine of Economic Paleontologists and Mineralogists[C]. Special Publication, 66: 7~14.
- Xi Binbin, Qian Yixiong, Shi Weijun, *et al.* 2015. The characteristics of primary inclusions in halite in Bachu Uplift of Tarim Basin and their implications for paleo-temperature: A case study of well Bt5[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(1): 79~86 (in Chinese with English abstract).
- Ye Desheng. 1992. The origin of the Qiulitage Group dolomite (Cambrian to Ordovician) in Northern Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10(4): 77~86 (in Chinese with English abstract).
- Ye Desheng. 1994. Deep dissolution of Cambrian-Ordovician carbonates in the Northern Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(1): 66~71 (in Chinese with English abstract).
- Yue Changtao, Li Shuyuan, Ding Kangle, *et al.* 2003. Simulation experiments on thermochemical sulfate reduction of methane with solid calcium sulfate[J]. *Geochimica*, 32(6): 601~605 (in Chinese with English abstract).
- Yun Lu and Zhai Xiaoxian. 2008. Discussion on characteristics of the Cambrian reservoir and hydrocarbon accumulation in Well Tahsn-1, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 29(6): 726~732 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jizhi, Wang Zhaoming, Yang Haijun, *et al.* 2017. Origin and differential accumulation of hydrocarbons in Cambrian sub-salt dolomite reservoirs in Zhongshen Area, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 40~47 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Junfeng and Gao Yongjin. 2020. Petroleum Geological Characteristics and Hydrocarbon Prospects of the Wensu Uplift in Tarim Basin

[M]. Geological Publishing House(in Chinese).

- Zhang Shuichang, Shuai Yanhua and Zhu Guangyou. 2008. TSR promotes the cracking of crude oil into gas: Simulated experimental evidence[J]. Science in China(Series D), 38(3): 307~311(in Chinese).
- Zhao Chuang, Yu Bingsong, Zhang Cong, *et al.* 2012. A discussion on the formation mechanism of dolomite associated with hydrothermal solution in Tazhong area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(2): 164~172(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, *et al.* 2018. Genetic types and distinguished characteristics of dolomite and the origin of dolomite reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 45(6): 923~935(in Chinese with English abstract).
- Zheng Herong, Wu Maobing, Wu Xingwei, *et al.* 2007. Oil-gas exploration prospect of dolomite reservoir in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 28(2): 1~8(in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, *et al.* 2013. Main controlling factors and characteristics of Cambrian dolomite reservoirs related to evaporite in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(1): 89~98(in Chinese with English abstract).
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, *et al.* 2005. Isotopic evidence of TSR origin of high H₂S natural gas in Feixianguan Formation in northeast Sichuan region[J]. Science in China(Series D), 35(11): 1 037~1 046(in Chinese English abstract).

附中文参考文献

- 曹自成, 尤东华, 漆立新, 等. 2020. 塔里木盆地塔深1井超深层白云岩储层成因新认识——来自原位碳氧同位素分析的证据[J]. 天然气地球科学, 31(7): 915~922.
- 程丽娟, 李忠, 刘嘉庆, 等. 2020. 塔里木盆地巴楚-塔中地区寒武系盐下白云岩储层成岩作用及物性特征[J]. 石油与天然气地质, 41(2): 316~327.
- 杜金虎, 潘文庆. 2016. 塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 43(3): 327~339.
- 方少仙, 何江, 侯方浩, 等. 2009. 鄂尔多斯盆地中部气田区中奥陶统马家沟组马五5-马五1亚段储层孔隙类型和演化[J]. 岩石学报, 25(10): 2 425~2 441.
- 方少仙, 侯方浩, 何江, 等. 2013. 碳酸盐岩成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 159.
- 胡安平, 沈安江, 杨翰轩, 等. 2019. 碳酸盐岩-膏盐岩共生体系白云岩成因及储盖组合[J]. 石油勘探与开发, 46(5): 916~928.
- 胡文瑄, 朱井泉, 王小林, 等. 2014. 塔里木盆地柯坪地区寒武系微生物白云岩特征、成因及意义[J]. 石油与天然气地质, 35(6): 860~869.
- 黄可可, 胡作维, 李小宁, 等. 2014. 川东北飞仙关组储层结晶白云岩的形成机制与白云化模式[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 41(5): 612~624.
- 黄擎宇, 胡素云, 潘文庆, 等. 2016. 塔里木盆地巴楚地区寒武系储层特征及主控因素[J]. 天然气工业, 27(6): 982~993.
- 黄擎宇, 刘迪, 叶宁, 等. 2013. 塔里木盆地寒武系白云岩储层特征及成岩作用[J]. 东北石油大学学报, 37(6): 63~74.
- 黄思静, 成欣怡, 赵杰, 等. 2012. 近地表温压条件下白云岩溶解过程的实验研究. 中国岩溶, 31(4): 349~359.
- 黄思静, 龚业超, 黄可可, 等. 2010. 埋藏历史对碳酸盐溶解-沉淀的影响——以四川盆地东北部三叠系飞仙关组和塔里木盆地北部奥陶系为例[J]. 地球科学进展, 25(4): 381~389.
- 黄思静, 黄可可, 张雪花, 等. 2009. 碳酸盐倒退溶解模式的化学热力学基础——与CO₂有关的溶解介质[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(5): 457~464.
- 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 等. 1996. 石膏对白云岩溶解影响的实验模拟研究[J]. 沉积学报, 14(1): 103~109.
- 金振奎, 杨有星, 余宽宏, 等. 2012. 塔里木盆地东部地区寒武系白云岩成因类型[J]. 古地理学报, 14(6): 747~756.
- 金之均, 龙胜祥, 周雁, 等. 2006. 中国南方膏盐岩分布特征[J]. 石油与天然气地质, 27(5): 571~583.
- 金之均, 周雁, 云金表, 等. 2010. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 31(6): 715~724.
- 刘朝全, 姜学峰. 2016. 2016年国内外油气行业发展报告[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 刘丽红, 王春连, 杜治利, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地东南部奥陶系马家沟组碳酸盐岩中黄铁矿成因[J]. 岩石矿物学杂志, 38(5), 705~716.
- 穆龙新. 2017. 全球油气勘探开发形势及油公司动态(2017)[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 聂鸿宇, 何幼斌, 罗进雄, 等. 2018. 四川盆地南部龙王庙组膏盐岩沉积环境及其对储层成岩作用的影响[J]. 河南科学, 36(1): 100~106.
- 邵龙义, 何宏, 彭苏萍, 等. 2002. 塔里木盆地寒武系巴楚隆起寒武系及奥陶系白云岩类型及形成机理[J]. 古地理学报, 4(2): 19~30.
- 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 等. 2016. 塔里木盆地中下寒武统白云岩

- 储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 43(3): 340~349.
- 田雷, 崔海峰, 陈永权等. 2015. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储层分布特征及勘探意义[J]. 天然气地球科学, 26(增刊 I): 130~138.
- 王招明, 谢会文, 陈永权, 等. 2014. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 19(2): 1~13.
- 席斌斌, 钱一雄, 施伟军, 等. 2015. 塔里木盆地巴楚隆起岩盐中原生包裹体特征及意义——以巴探5井为例[J]. 岩石矿物学杂志, 34(1): 79~86.
- 叶德胜. 1992. 塔里木盆地北部丘里塔格群(寒武系至奥陶系)白云岩的成因[J]. 沉积学报, 10(4): 77~86.
- 叶德胜. 1994. 塔里木盆地北部寒武-奥陶系碳酸盐岩的深部溶蚀作用[J]. 沉积学报, 12(1): 66~71.
- 岳长涛, 李术元, 丁康乐, 等. 2003. 甲烷和固态硫酸钙的热化学还原反应模拟实验初步研究[J]. 地球科学, 32(6): 601~605.
- 云露, 翟晓先. 2008. 塔里木盆地塔深1井寒武系储层与成藏特征探讨[J]. 石油与天然气地质, 29(6): 726~732.
- 张纪智, 王招明, 杨海军, 等. 2017. 塔里木盆地中深地区寒武系盐下白云岩油气来源及差异聚集[J]. 石油勘探与开发, 44(1): 40~47.
- 张君峰, 高永进. 2020. 塔里木盆地温宿凸起石油地质特征与油气远景[M]. 北京: 地质出版社.
- 张水昌, 帅燕华, 朱光有. 2008. TSR促进原油裂解成气: 模拟实验证据[J]. 中国科学: D辑, 38(3): 307~311.
- 赵闯, 于炳松, 张聪, 等. 2012. 塔中地区与热液有关白云岩的形成机理探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 31(2): 164~172.
- 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 2018. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因[J]. 石油勘探与开发, 45(6): 923~935.
- 郑和荣, 吴茂炳, 邬兴威, 等. 2007. 塔里木盆地地下古生界白云岩储层油气勘探前景[J]. 石油学报, 28(2): 1~8.
- 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 2013. 塔里木盆地寒武系与蒸发岩相关的白云岩储层特征及主控因素[J]. 沉积学报, 31(1): 89~98.
- 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 2005. 川东北地区飞仙关组高含 H_2S 天然气 TSR成因的同位素证据[J]. 中国科学(D辑), 35(11): 1037~1046.