

中国的白云岩与白云岩储层:分布、成因与控制因素

何治亮^{1,2,3}, 马永生^{1,2}, 张军涛³, 朱东亚³, 钱一雄³, 丁茜³, 陈代钊⁴

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728;

3. 中国石化石油勘探开发研究院构造与沉积储层实验室, 北京 100083;

4. 中国科学院地质与地球物理研究所油气资源研究重点实验室, 北京 100029)

摘要: 中国是世界上少有的几乎每个地质时代都有白云岩分布的国家。从华北地区的元古宇到第四系的盐湖沉积物, 都能见到各种类型的白云岩(石), 但白云岩在层位和区域上分布不均, 类型上也有明显差异。其中, 下古生界白云岩分布最为普遍, 而上古生界、中生界和新生界仅有局部地区发育白云岩。中国白云岩的类型和与之相对应的白云岩化作用主要有: 微生物(生物)白云岩化、萨布哈白云岩化、回流渗透白云岩化、热液白云岩化和混合水白云岩化。由于白云岩化作用是一个持续或断续的、复杂的过程, 即使同一层系的白云岩也会经历多期次、多类型白云岩化作用的叠加改造。白云岩是中国重要的油气储层, 其类型多、形成时间跨度大。在深层和古老海相层系之中, 白云岩比灰岩更易于形成优质的油气储层, 由此其重要性显得更为突出。在晚古生代和中、新生代形成的湖相白云岩也具有很好的储集性能, 是非常规油气的重要赋存场所。白云岩储层按照其形成主控因素可以大致分为4种基本类型: 相控准同生溶蚀型、面控表生溶蚀型、断控深埋改造型和深埋生烃溶蚀型。白云岩储层形成和保持受构造、层序、岩相、流体和时间五因素的联合、复合作用所控制。这些因素和成储机制的差异, 造就了白云岩储层发育展布的多样性。

关键词: 油气储层; 成因机理; 白云岩化; 白云岩; 塔里木盆地; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China

He Zhiliang^{1,2,3}, Ma Yongsheng^{1,2}, Zhang Juntao³, Zhu Dongya³, Qian Yixiong³, Ding Qian³, Chen Daizhao⁴

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China; 3. Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology,

Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of Petroleum

Resource Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: China is one of the few countries in the world where dolomites were developed throughout its geological age. Various types of dolomites can be found from the Proterozoic in North China to the Quaternary salt lake sediments, but the distribution of dolomites is uneven along stratigraphy and across region, with also a great variety in types. The dolomites are widespread in the Lower Paleozoic but become more local features in the Upper Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic. The types of dolomitization mainly include microbial (biological), Sabkha, reflux seepage, hydrothermal and mixing zone dolomitization. Because dolomitization is a complicated, long term or intermittence process, even dolomites of the same strata would undergo multiple stages of dolomitization with several types superimposed. Dolomite reservoir is an important oil and gas reservoir in China, featuring variety in types and large time span. In the deep and ancient marine strata series, dolomite is more prone to generate high-quality oil and gas reservoirs compared with limestone. So its importance is even more prominent. Lacustrine dolomites formed in the Late Paleozoic and Meso-Cenozoic are also good in reservoir properties, serving as important reservoirs of unconventional oil and gas. The formation and preservation of dolomite reservoirs are jointly controlled by structure, sequence, lithofacies, fluid, and time. Alto-

收稿日期: 2019-10-14; 修订日期: 2019-12-06。

第一作者简介: 何治亮(1963—), 男, 博士、教授级高级工程师, 石油地质。E-mail: hezhiliang@sinopec.com。

通讯作者简介: 马永生(1961—), 男, 博士、中国工程院院士, 沉积学、石油地质学研究和油气勘探。E-mail: mayys@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(U1663209); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003); 国家科技重大专项(2017ZX05005); 中国科学院A类战略性先导项目(XDA14010201)。

gether four types of controlling factors are identified herein: sedimentary facies-controlled para-syn depositional dissolution, ground surface-controlled shallow karstification, fault-controlled reformation in deep burial and deeply buried hydrocarbon dissolution. In all, the factors mentioned, together with different reservoir space generation and accumulation mechanisms, collectively decide the wide type spectrum and the complicated distribution patterns of dolomite reservoirs.

Key words: oil and gas reservoir, genetic mechanism, dolomitization, dolomite, Tarim Basin, Ordos Basin

“白云石(岩)问题”(dolomite problem)是地质学中的世纪难题,其内涵为“地质时代广泛发育,但是现代沉积很少出现。常温常压实验室无法合成白云石^[1-3]。”1791年,法国地质学家 Deodat Dolomieu 在意大利北部的多洛米蒂山发现并命名了白云岩,由此拉开了白云岩研究的序幕^[4]。两百余年来,各种有关白云岩成因的学说风起云涌,却始终未能完全达成共识。由于白云岩中常常发育丰富的各类孔隙,它们可作为优质的油气储集空间,因而引起石油地质学家和油气工业界浓厚的兴趣^[2,5-7]。

中国白云岩研究起步相对较晚,但也有八十多年的历史。中文的“白云岩”一词来源于日本地质学家横山又次郎的《地质学》(1895),由张相文于1909年编译引入。李春昱、高振西和黄汲清等地质学家曾在1936—1938年的文献中先后提及白云岩。在20世纪中叶,各种白云岩成因学说如火如荼之时,中国的白云岩研究却陷入了漫长的沉寂期。20世纪80年代前,中国关于白云岩的专门论著仅有10篇左右。之后,随着中国海相油气先后取得一系列的重大发现,中国白云岩研究开始迎来真正的春天,每年都能发表10篇以上的白云岩论文。近二十余年来,随着靖边、普光—元坝及安岳等大型白云岩气田的发现^[8-10],中国白云岩领域的研究无论是在理论上还是在实践中都取得了可喜的成果;尤其是在埋深大于4 500 m的深层,甚至大于6 000 m的超深层白云岩中发现了优质的白云岩储层,颠覆了前人认为深层不太可能存在有效储层的认识,初步揭示了深埋条件下白云岩中储集空间形成与保存的机理^[11-13],标志着中国白云岩研究迈入到世界先进行列。

纵观近百年历程,中国的白云岩以及白云岩储层研究和勘探实践目前已渐入佳境,成果丰硕,可圈可点,但系统讨论、回顾和总结中国白云岩和白云岩储层的论著或专辑并不太多。本文试图通过梳理中国白云岩和白云岩储层发育展布及成因机理等研究现状,来展示先驱者已有的研究成果,并与本专辑的其他作者一起,共同推进中国白云岩与白云岩储层的研究工作,以期能为后来者的相关研究提供引玉

之砖。

1 中国白云岩(石)时空分布

中国是世界上少有的几乎每个地质时代都有白云岩分布的国家。从华北地区的元古宇到第四系的盐湖沉积物,各个层系都能见到各种类型的白云岩(石),但白云岩在层位和区域上分布极度不均,类型上也有明显差异(表1)。

1.1 元古宇白云岩

中国最古老的白云岩位于山西五台山地区的2.2 Ga 古元古界滹沱系南台组之中。南台组之上同为滹沱群的大石岭组和东冶亚群开始出现厚层的白云岩^[43-44]。华北板块克拉通化之后的古元古代晚期,随着以燕辽拗拉槽为代表的克拉通内裂谷和拗陷的形成,形成了第一套区域性碎屑岩与碳酸盐岩地层。长城系团山子组和大红峪组中发育以铁质和砂质为主的白云岩,偶见有叠层石白云岩。

到中元古代蓟县纪,白云岩已成为华北地区(包括鄂尔多斯盆地)地层中最主要的岩石类型,尤其以叠层石白云岩最具特色(图1a);白云岩经过后期多次改造溶蚀,成为渤海湾盆地任丘油田最重要的一套储集层。在中扬子和云南地区,中元古界的神农架群和昆阳群也都发育有厚层的白云岩^[40-41]。

上元古界青白口系和南华系中白云岩含量明显减少。青白口系以页岩、砂岩和灰岩为主,但在中祁连和燕山东翼也曾发现白云岩^[39]。南华系以冰碛岩、页岩和粉砂岩为主,在南沱组也曾见到少量白云岩^[38]。

上元古界震旦系又是一个发育白云岩的层系。盖帽白云岩是震旦系下部的标志层,全球范围内具有很好的可对比性。扬子地区陡山沱组和塔里木地区特瑞爱肯组都有这类白云岩^[37]。震旦系上部普遍发育藻白云岩,如中、上扬子地区的灯影组和塔里木盆地的奇格布拉克组(图1b,c)。其中,灯影组藻白云岩是威远气田和安岳气田的一套重要的油气储层。

表 1 中国白云岩分布层系与地区
Table 1 Distribution of dolomite along strata and across areas in China

地层		白云岩(石)	分布地区	代表著作
新生界	第四系	分散的白云石沉积物	青海湖,巴彥查干湖,西沙群岛	于炳松等,2007 ^[14] ;姜文英等,2010 ^[15] ;曲高生等,1990 ^[16]
	新近系	颗粒、泥晶白云岩,微晶、细-粉晶白云岩	渤海湾盆地歧口凹陷、泌阳凹陷、潜江凹陷,柴达木盆地始新统,中国南海	廖静等,2008 ^[17] ;黄杏珍等,2001 ^[18] ;吴世强等,2020 ^[19] ;黄成刚等,2016 ^[20]
	古近系			
中生界	白垩系	中-细晶白云岩,灰质白云岩,纹层状泥晶原生含铁白云岩,泥晶白云岩,层状、椭球状白云岩	措勤盆地,酒泉盆地,银额盆地,松辽盆地	李亚林等,2008 ^[21] ;文华国等,2014 ^[22] ;王国栋,2008 ^[23] ;陈志鹏等,2018 ^[24]
	侏罗系	颗粒、晶粒白云岩	羌塘盆地	万友利等,2020 ^[25]
	三叠系	含膏白云岩,颗粒白云岩,晶粒白云岩,藻白云岩	四川盆地	谭秀成等,2008 ^[26]
上古生界	二叠系	颗粒白云岩,晶粒白云岩,礁白云岩,斑状白云岩	四川盆地,准噶尔盆地,羌塘盆地	冯有良等,2011 ^[27] ;胡俊杰等,2014 ^[28]
	石炭系	颗粒白云岩,晶粒白云岩	四川盆地,塔里木盆地,武威盆地	阎凤存等,2011 ^[29]
	泥盆系	颗粒白云岩,晶粒白云岩	四川盆地,滇黔桂湘地区	谢增业等,2018 ^[30] ;马青等,2001 ^[31]
下古生界	志留系	生物礁白云岩,黑色页岩中的白云石	扬子地区,酒西盆地,云南哀牢山	谢全民等,2001 ^[32] ;李华等,2017 ^[33]
	奥陶系	含膏白云岩,颗粒白云岩,晶粒白云岩,藻白云岩,斑状云灰岩	四川盆地,塔里木盆地,华北地区(含鄂尔多斯盆地)	何莹等,2006 ^[34] ;黄正良等,2011 ^[35]
	寒武系	含膏白云岩,颗粒白云岩,晶粒白云岩,藻白云岩	四川盆地,塔里木盆地,华北地区(含鄂尔多斯盆地)	何莹等,2006 ^[34] ;孙海涛等,2018 ^[36]
元古宇	震旦系	盖帽白云岩,藻白云岩,晶粒白云岩	扬子地区,塔里木盆地	何金有等,2007 ^[37]
	南华系	白云岩	扬子地区	管开萍等,2016 ^[38]
	青白口系	白云岩	中祁连山,燕山东翼	刘梦儒,1995 ^[39]
	蓟县系	藻白云岩	华北地区,扬子地区,云南	旷红伟等,2018 ^[40] ;常向阳等,1997 ^[41]
	长城系	铁质白云岩,砂质白云岩	华北地区	张明洋,2012 ^[42]
	溱沔系	晶粒白云岩	山西五台山	钟华等,1995 ^[43] ;陈威宇等,2018 ^[44]

1.2 下古生界白云岩

下古生界是中国白云岩最为发育的层系之一,由老到新呈现出白云岩含量先增加后逐渐减少的趋势。中、上寒武统白云岩最多,奥陶系次之,志留系白云岩明显变少。

寒武系白云岩主要分布于第三统和芙蓉统,纽芬兰统和第二统白云岩还不是主要岩性。中、上扬子地区和塔里木地区纽芬兰统以页岩、磷块岩和硅质岩为主,仅见少量白云岩。扬子、华北和塔里木地区寒武系第二统既有碎屑岩,也有白云岩。扬子地区龙王庙组白云岩开始大量出现,为颗粒白云岩和粉晶白云岩(图 1d)。塔里木盆地的肖尔布拉克组出现了一套从盆地到台地边缘再到开阔台地、局限台地的岩相组合,以各类微生物白云岩为特色。第三统和芙蓉统,白云岩成为三大克拉通地区最主要的岩性。华北地区(含鄂尔多斯盆地)的徐庄组、张夏组、崮山组、长山组

和凤山组,以及扬子地区的娄山关组和洗象池组都含有大量的白云岩;塔里木盆地的丘里塔格下亚群也主要为白云岩,类型有颗粒白云岩、藻白云岩和晶粒白云岩等。

奥陶系白云岩分布与寒武系正好相反,下奥陶统白云岩最多,向上逐渐减少。塔里木盆地地下奥陶统蓬莱坝组主要为厚层白云岩,鹰山组下部夹白云岩,上奥陶统灰岩中偶见白云石斑块。华北地区与塔里木盆地类似,下奥陶统治里组、亮甲山组和马家沟组有大量的白云岩,西部的鄂尔多斯盆地以白云岩为主(图 1e),而峰峰组之上则很少能见到成套的白云岩。扬子地区奥陶系白云岩主要分布于下统的桐梓组 and 红花园组。

中国志留系白云岩分布较少,仅在扬子地区以及酒西鸭儿峡油田和云南哀牢山见到白云岩^[32-33]。宁蒗地区上志留统竹地组见到了厚层白云石,其具有良好的储集性能。

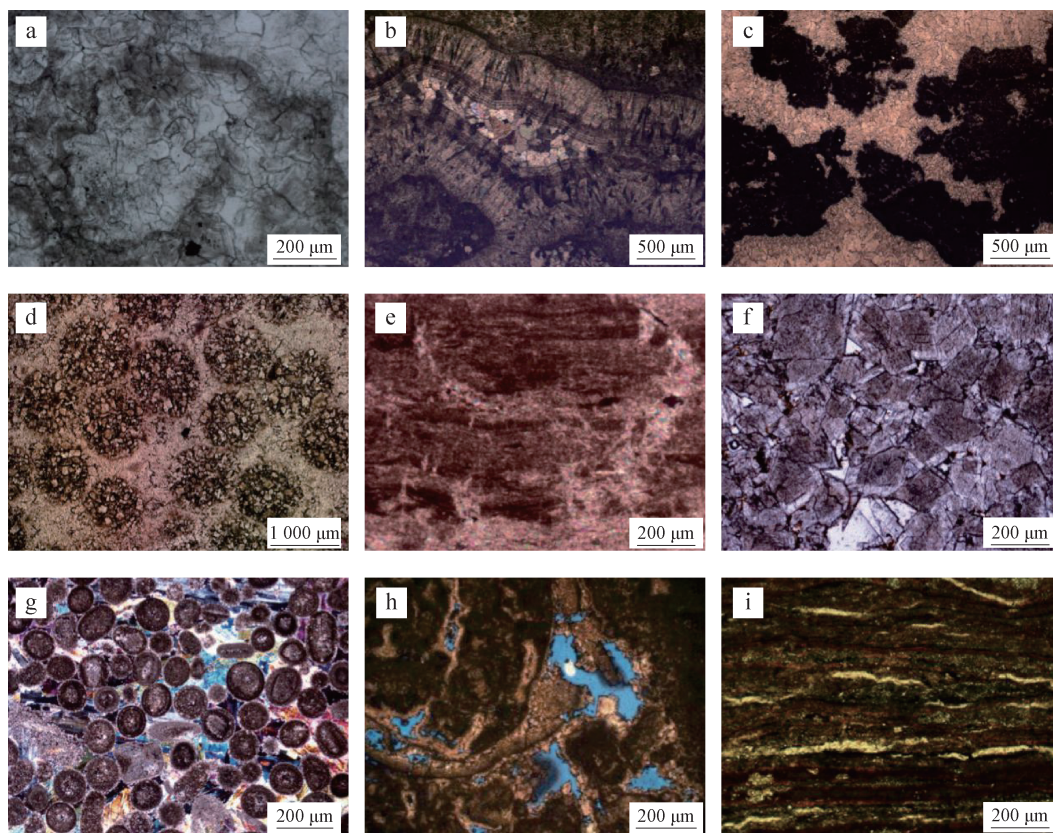


图1 中国典型白云岩类型

Fig. 1 Typical dolomite types in China

a. 粉晶白云岩,溶孔被石英白云石充填,白云石具有环带结构,蓟县系雾迷山组,北京得胜口;b. 藻白云岩,溶孔被放射状(皮壳状)白云石充填,震旦系灯影组,四川范店;c. 藻白云岩,藻粘结呈团块状分布,亮晶白云石充填,震旦系灯影组,四川范店;d. 鲕粒白云岩,鲕粒多粉-细晶白云石,部分鲕粒及粒间、晶间发育孔隙,寒武系龙王庙组,YD2井,四川盆地;e. 藻白云岩,发育裂缝,裂缝内有硬石膏充填,奥陶系马家沟组,D50井,鄂尔多斯盆地;f. 细晶白云岩,具有雾心亮边结构,二叠系栖霞组,四川峡沟煤矿;g. 颗粒白云岩,粒间为硬石膏充填,三叠系嘉陵江组,D11井,四川盆地;h. 藻白云岩,藻粘结白云石多为泥晶,三叠系雷口坡组,YS1井,四川盆地;i. 泥质白云岩,水平层理发育,由富含有机质的泥质纹层和泥晶白云石纹层构成,单偏光,古近系潜江组,WY11井,江汉盆地

1.3 上古生界白云岩

加里东运动之后,中国三大克拉通均遭受了较强烈的挤压和抬升剥蚀,泥盆系和石炭系分布较少,主要为阶段性海侵背景下的碎屑岩和碳酸盐岩沉积。泥盆系和石炭系的白云岩分布也较为局限。扬子地区泥盆系白云岩主要分布于川西北和滇黔桂湘地区,观雾山组是川西北取得新突破的重要目的层。石炭系白云岩主要分布于四川盆地东部,黄龙组是该区一套重要的储集层。在塔里木盆地和武威盆地地下石炭统也有少量白云岩^[31,45-46]。

二叠系白云岩在四川盆地分布广泛,但时空分布不均。中二叠统栖霞组-茅口组白云岩分布于川西北、川南和川东的部分地区,主要为晶粒白云岩和颗粒白云岩,这也是新近取得天然气重大突破的层系,本专辑也专门讨论了这套白云岩储层。上二叠统长兴组生物礁白云岩主要分布于川东北地区,是普光-元坝地

区重要的勘探目的层。准噶尔盆地西北缘的凤城组及准东地区的芦苇沟组和红雁池组发育湖相白云岩,羌塘盆地也有白云岩分布^[27,29]。

1.4 中生界白云岩

晚海西运动之后,塔里木、华北两大克拉通及周缘以陆相沉积为主。海相地层主要分布于扬子与青藏地区。中、上扬子地区的中、下三叠统成为白云岩发育的主要层段。其中,四川盆地的飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组都是与膏盐相伴生的以白云岩为主的层系,是四川盆地天然气重要的勘探层系,其白云岩类型有颗粒白云岩、泥-粉晶白云岩以及藻白云岩等。

侏罗系白云岩仅分布在羌塘盆地,有多种白云岩类型。在本专辑中,万利有等^[25]重点讨论了羌塘盆地中侏罗统布曲组白云岩的成因。

白垩系白云岩发育在西藏措勤盆地的郎山组,主

要为中-细晶白云岩和灰质白云岩^[28];塔里木盆地西南坳陷上白垩统见海相白云岩。酒泉盆地白垩系陆相碎屑岩地层中夹湖相白云岩,岩性为纹层状泥晶原生含铁白云岩^[25],银额盆地和松辽盆地也在白垩系钻遇到泥晶白云岩和层状白云岩、椭球状白云岩^[21-22]。

1.5 新生界白云岩(石)

新生代中国大陆干旱-半干旱气候背景下,形成了一套含膏盐岩和碳酸盐岩的陆相碎屑岩沉积,多个盆地见到白云岩,是湖相页岩油和致密油潜在的勘探对象。中国东部渤海湾盆地的歧口凹陷^[23]、泌阳凹陷^[24]和潜江凹陷^[19]古近系均见到了厚度不等的泥晶、泥质白云岩。柴达木盆地始新统^[17]也发育湖相粗粒白云岩和泥晶白云岩。中国南海中新统和上新统中也发现了厚层海相白云岩,岩性有富铁的微晶和细-粉晶白云岩^[47]。

最近十余年来,中国学者分别在多个现代盐湖中发现了白云石沉积物,如青海湖^[18]和内蒙巴彦查干湖^[19]。在西沙群岛现代生物礁沉积物中也检测出白云石^[20]。

2 中国白云岩成因类型

中国的白云岩除了分布地域广、分布层系多外,白云岩类型和与之对应的白云岩化作用也丰富多彩。几

十年来,国内外众多学者在中国开展了广泛且卓有成效的工作,先后发现了几乎所有国外已发现的白云岩类型。其中,报道得相对较多的白云岩化作用有微生物(生物)白云岩化、萨布哈白云岩化、回流渗透白云岩化、埋藏白云岩化、热液白云岩化和混合水白云岩化等(表 2)。

2.1 微生物(生物)白云岩化

自 20 世纪末以来,McKenzie 研究团队发表了一系列与微生物白云岩相关的研究成果,点燃了学界对微生物白云化作用研究的热情,也掀起了“原白云石(岩)”研究的高潮,成为近十年白云石(岩)研究的一个新热点^[1]。

研究形成的主要共识包括:微生物活动能调节白云岩形成环境的酸碱度,增加流体的 Mg/Ca 比值,破坏 Mg^{2+} 离子的水合作用,并能够为白云石析出提供质点(胞外聚合物)^[1]。

国内学者报道的微生物白云石主要有 4 种类型:1)在古老层系中发现的有具有微生物形态的白云石^[47];2)与微生物岩相伴生的白云岩,如灯影组和雷口坡组中的藻白云岩^[14];3)具有微生物形态的湖相白云岩(石),如准噶尔盆地芦草沟组微晶白云岩^[15];4)与生物潜穴特殊的微环境有关的白云岩化,如在华北地区奥陶系马家沟组和塔里木盆地奥陶系鹰山组-良里塔格组所见到的豹斑状白云质灰岩^[16]。

表 2 中国主要白云岩化类型与分布层系
Table 2 Types of dolomitization and distribution of dolomites in China

白云岩化类型	地区层位	代表著作	
微生物(生物)白云岩化	塔里木盆地中寒武统,四川盆地灯影组和雷口坡组,准噶尔盆地芦草沟组,华北地区马家沟组等	You 等,2013 ^[48] ;陈娅娜等,2017 ^[49] ;李红,2013 ^[50] ;董小波等,2015 ^[51]	
萨布哈白云岩化	四川盆地三叠系飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组,塔里木盆地中寒武统-奥陶系,鄂尔多斯盆地马家沟组等	邵龙义等,2002 ^[52] ;张军涛等,2017 ^[53]	
回流渗透白云岩化	塔里木盆地寒武系,四川盆地龙王庙组和长兴组等,鄂尔多斯盆地南部奥陶系等	邵龙义等,2002 ^[52] ;孙海涛等,2018 ^[36] ;陈琪等,2012 ^[54] ;黄正良等,2011 ^[35]	
热液白云岩化	热液改造	四川盆地灯影组和中二叠统,塔里木盆地寒武系和灯影组等	唐雪松等,2016 ^[55] ;张涛等,2020 ^[56] ;焦存礼等,2011 ^[57] ;宋光永,2009 ^[58]
	热水沉积	新疆三塘湖盆地三叠系,二连盆地白音查干凹陷白垩系	柳益群,2010 ^[59] ;钟大康,2015 ^[60]
混合水白云岩化	四川盆地二叠系,鄂尔多斯盆地马家沟组等	陈琪等,2012 ^[54] ;田景春等,2014 ^[61]	
埋藏白云岩化	塔里木盆地奥陶系,鄂尔多斯盆地马家沟组等	钱一雄等,2006 ^[62] ;张学丰等,2008 ^[63] ;黄正良等,2011 ^[35]	
玄武岩淋滤白云岩化	四川盆地二叠系	金振奎等,1999 ^[64]	
淡水白云岩化	四川盆地石炭系	胡忠贵等,2008 ^[65]	

2.2 萨布哈白云岩化

萨布哈白云岩化往往用来解释形成于蒸发潮坪、潟湖和局限台地中,与膏盐相伴生的白云岩。萨布哈是指海岸带蒸发潮坪和内陆干旱的盐泽地区,命名来源于阿拉伯海湾。萨布哈模式是强蒸发干旱环境下白云岩化的代表模式之一。萨布哈的水文环境被描述为由洪水充注、毛细管浓缩和蒸发泵吸3个连续的阶段组成^[2-3]。

中国的萨布哈白云岩主要分布于三大克拉通的含膏层系之中,如四川盆地三叠系的飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组,塔里木盆地的中寒武统^[48],以及鄂尔多斯盆地的马家沟组^[49]。萨布哈白云岩一般具有较细晶体,多为泥-粉晶,呈层状产出,常见有硬石膏结核、纹层、石盐假晶、鸟眼和帐篷构造等。由于这类白云岩的沉积成岩环境与微生物活动密切相关,对其成因认识也有分歧,有人认为这类白云岩可能属于微生物白云岩的一种特殊类型。

2.3 回流渗透白云岩化

在缺乏蒸发盐矿物但白云岩较为发育的层段,往往被认为是浅埋藏期渗透回流白云岩化作用的产物。其基本原理为:随着蒸发作用的加强,卤水密度不断增大;这种与正常海水的密度差,引起对流和下渗;当这种高盐度富 Mg^{2+} 离子流体渗入到灰岩地层中时,发生白云岩化,形成较大规模的白云岩地层^[2-3]。

回流渗透白云岩化作用是中国古生界各层系中报道最多的白云岩化类型,如塔里木盆地寒武系^[48],四川盆地的龙王庙组^[50]和长兴组等^[51],以及鄂尔多斯盆地南部奥陶系^[52]等。回流渗透白云岩主要存在两种类型:一种为相对低能环境下形成的具层状粉-细晶结构的白云岩,其储集物性较差;另一种是形成于相对高能环境的具有颗粒或颗粒幻影结构的白云岩,其储集物性往往较好。

萨布哈白云岩化作用和回流渗透白云岩,在纵向上和平面上往往会互相叠置,构成区域上大套的白云岩层系,如塔里木盆地寒武系,鄂尔多斯盆地奥陶系,以及四川盆地寒武系-奥陶系和中、下三叠统等。

2.4 热液白云岩化

热液白云岩化是近年来备受关注的白云岩化类型。2006年,AAPG专门出版了热液白云岩储层专辑。经典的热液白云岩化模式认为,此类白云岩多与断裂关系密切,富镁的热液流体沿断裂上涌,当遇到上覆的

致密岩层时,热液流体与围岩发生白云岩化作用,形成具有特殊结构、白云石晶体形态、伴生矿物和地球化学特征的白云岩。由于存在与热液活动相关的水力破裂、溶蚀和交代作用,热液白云岩常常具有良好的储集性能^[53]。

热液白云岩的主要分布层位为四川盆地中二叠统^[36,54],塔里木盆地震旦系和寒武系^[35],以及上扬子地区灯影组^[66]。其他地区 and 层系也有零星的报道。

热液白云岩中的白云石晶体较粗,溶孔和晶间孔发育,孔隙之中常见到鞍状白云石。但是热液白云岩往往分布比较局限,要形成大规模的储集体需要很多有利因素的良好匹配。

另外,还有一类准同生期的热水沉积白云岩,不同于前述后期的热液改造型白云岩,多见于湖相沉积物中,如新疆三塘湖盆地三叠系所发现的湖相喷流型热水白云岩^[55]和二连盆地白音查干凹陷白垩系中与白烟型热水相关的白云岩^[67]。

2.5 混合水白云岩化

混合水白云岩化是指两种对白云石不饱和的流体,如大气降水和海水,按一定比例混合后变得对白云石饱和,从而发生白云岩化作用。由于混合水白云岩化作用通常发生在较低盐度的海水中,以往多用来解释与礁滩相有关的白云岩化,如四川盆地二叠系^[51,57]。

近年来,基于新的实验模拟和地球化学数据的重新解释,越来越多的学者对混合水白云岩化作用机理提出了质疑^[2-3]。

2.6 埋藏白云岩化

不同于浅埋藏期的回流渗透白云岩化作用,埋藏白云岩化既是指埋藏过程中的白云岩化,也是指在早期形成的白云岩在埋藏阶段的调整。由于在深埋藏阶段,动力学障碍已经大为降低,白云岩化或白云岩再调整变得相对容易,也会促使白云岩的矿物学和地球化学特征发生重置,所以古老的白云岩,如塔里木盆地和鄂尔多斯盆地寒武系-奥陶系白云岩^[58-60],往往会表现出埋藏白云岩的特征。

除上述主要的白云岩化作用类型之外,还有关于正常海水白云岩化、玄武岩淋滤白云岩化及淡水白云岩化的少量报道^[61-62]。

由于侧重点的不同以及实验数据的多解性,同一层系的白云岩可能会被不同的学者解释成不同的白云岩化,这也从另一个层面说明了白云岩问题的复杂性。

如四川盆地中二叠统白云岩,就存在热液白云岩化、混合水白云岩化和回流渗透白云岩化等多种解释。由于白云岩化往往是一个持续或断续的、复杂的过程,即使同一层系的白云岩也会经历多期次、多类型白云岩化作用的叠加改造。如塔里木盆地寒武系白云岩,就受到了萨布哈或微生物、回流渗透和多期热液白云岩化的影响,岩石结构和地球化学特征多变,对成因机理的认识就会出现明显分歧,犹如盲人摸象。

3 中国白云岩储层形成与保持控制因素

3.1 储层分布

白云岩是中国重要的油气储层(表3;图2)。中国三大海相气田(靖边气田、普光气田和安岳气田)储层均为白云岩。鄂尔多斯盆地的靖边气田,储层为下奥陶统马家沟组白云岩^[63];四川盆地的普光气田以及同处开江-梁平陆棚边缘的元坝、龙岗和罗家寨气田,储层为上二叠统长兴组生物礁白云岩和下三叠统飞仙关组鲕粒白云岩^[64-65];四川盆地的安岳特大气田,储层为震旦系灯影组和寒武系龙王庙组白云岩^[68]。

在深层和古老层系之中,白云岩储层的重要性显得尤为突出。华北油田的潜山油藏,储层为中、新元古界的雾迷山组白云岩^[70];四川盆地的威远气田,储层为震旦系灯影组白云岩^[71]。最近,相继在大于6 000 m的超深层领域白云岩储层取得了重要油气发现。四川盆地元坝气田白云岩储层埋深达到6 200~7 300 m,川西气田雷口坡组白云岩储层埋深总体大于6 000 m,

川北马深1井和川深1井在埋深大于8 000 m的灯影组也见到了优质的白云岩储层。塔里木盆地塔中地区中深1井也在深度6 400 m以深的寒武系发现优质白云岩储层,塔北地区的塔深1井在埋深8 000多米仍发育有优质白云岩储层^[72,76-77]。

在湖相沉积中的白云岩也具有很好储集性能。如在准噶尔盆地西北缘风城组白云岩中持续获得重大突破^[29]。渤海湾盆地北塘凹陷古近系沙河街组三段泥质白云岩,也是一套重要的油气储集层^[23]。江汉盆地潜江组泥质白云岩是一套非常规油气储层^[19]。

3.2 四种储层成因类型

中国的白云岩储层按照主控因素可以大致分为4种基本类型:相控准同生溶蚀型、面控表生溶蚀型、断控深埋改造型和深埋生烃溶蚀型(图3)。

1) 相控准同生溶蚀型

原始沉积环境是这类储层最重要的控制因素。相控准同生溶蚀型储层多分布于高能沉积相之中,如台地边缘或中缓坡,川东北普光-元坝-龙岗气田的长兴组-飞仙关组、安岳气田的龙王庙组和川西的雷口坡组是典型代表。储层岩石多为礁白云岩、颗粒云岩和晶粒白云岩,储集空间类型有粒间孔、粒内孔、晶间孔和溶蚀孔洞。关键的成岩作用有浅埋藏期的回流渗透白云岩化作用和准同生期的大气淡水溶蚀作用,白云岩化在这类储层的形成和保持中起着重要的作用,能够改善储层的储集性能。另外,可能伴生微生物介导下的溶蚀与胶结作用,埋藏期有机酸的溶蚀作用、构造破裂与热液溶蚀-胶结作用也是常见的成岩作用。

表3 中国主要白云岩储层分布层系与孔隙类型

Table 3 Strata and pore types of major dolomite reservoirs in China

盆地	油气田/藏	层位	孔隙类型	代表著作
四川盆地	安岳气田等	寒武系龙王庙组,震旦系灯影组	粒间孔、晶间孔	杜金虎等,2014 ^[69]
	普光气田、元坝气田等	二叠系长兴组,三叠系雷口坡组	粒间孔、晶间孔、溶孔	马永生等,2005,2006 ^[70-71]
	磨溪气田	三叠系嘉陵江组、雷口坡组	粒间孔	谭秀成,2008 ^[26]
	威远气田等	震旦系灯影组	粒间孔、溶蚀孔洞	罗志立等,1998 ^[72]
	川西气田、川西北中坝气田等	三叠系雷口坡组	粒间孔	吴世祥等,2011 ^[73]
	川东卧龙河气田、大池干气田等	石炭系黄龙组	粒间孔、晶间孔	胡忠贵等,2008 ^[65]
鄂尔多斯盆地	靖边气田等	奥陶系马家沟组	膏模孔、晶间孔	何自新等,2005 ^[68]
塔里木盆地	和田河气田等	奥陶系鹰山组、蓬莱坝组	溶蚀孔洞、裂缝	杨威等,2000 ^[74]
	雅克拉气田等	上寒武统-下奥陶统	溶孔、晶间溶孔	何莹等,2006 ^[34]
准噶尔盆地	准西北缘风城油田等	二叠系风城组	晶间孔、裂缝	冯有良等,2011 ^[27]
渤海湾盆地	任丘油田等	蓟县系雾迷山组	裂缝、溶蚀孔洞	赵贤正等,2008 ^[75]
	塘沽油田等	古近系沙河街组	晶间孔	廖静等,2008 ^[17]
江汉盆地	王庄油田等	古近系潜江组	晶间孔	吴世强等,2020 ^[19]

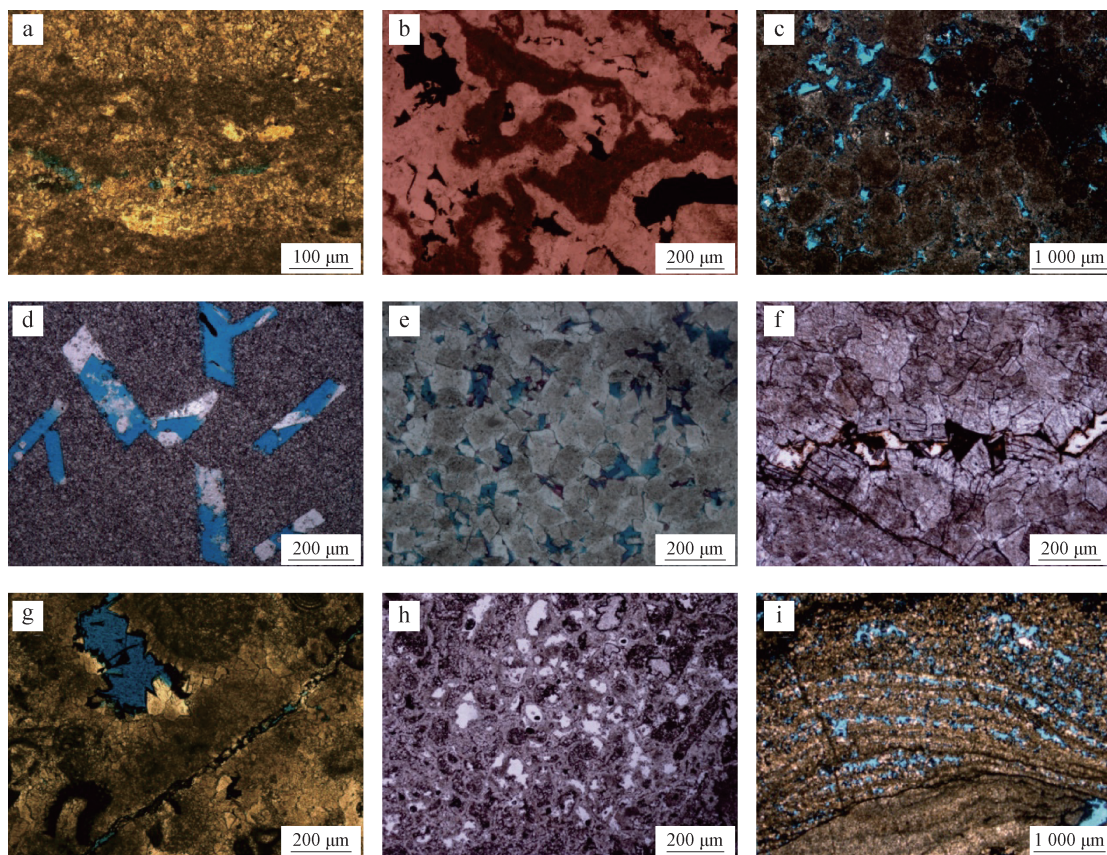


图2 中国典型白云岩储层类型

Fig. 2 Typical types of Chinese dolomite reservoirs

a. 泥-粉晶白云岩, 溶孔发育, 蓟县系雾迷山组, 天津蓟县 (由李朋威提供); b. 藻白云岩, 溶孔发育, 内有石英、沥青和白云石充填, 震旦系灯影组四段, 四川盆地南江桥亭剖面 (由郝运轻提供); c. 鲕粒白云岩, 晶粒多为粉-细晶白云石, 粒间、晶间发育孔隙, 寒武系龙王庙组, YD2井, 中扬子地区; d. 粉晶白云岩, 发育有硬石膏铸模孔, 奥陶系马家沟组, D113井, 鄂尔多斯盆地; e. 细晶白云岩, 发育晶间孔和晶间溶孔, 奥陶系马家沟组, D50井, 鄂尔多斯盆地; f. 细晶白云岩, 发育有裂缝, 沥青充填, 二叠系栖霞组, 四川峡沟煤矿; g. 细晶白云岩, 溶孔发育, 二叠系长兴组, D11井, 四川盆地; h. 颗粒白云岩, 粒内溶孔发育, 三叠系嘉陵江组, S1井, 四川盆地; i. 叠层石白云岩, 叠层石间有溶孔发育, 三叠系雷口坡组, YS1井, 四川盆地

2) 面控表生溶蚀型

大型不整合面控制的表生期大气淡水溶蚀作用是这类储层最关键的成岩作用。典型的面控表生溶蚀型储层包括威远气田的灯影组四段, 靖边气田的马家沟组, 雅克拉、牙哈、英买力的上寒武统-下奥陶统, 以及任丘油田的雾迷山组等。储层岩石和白云岩化作用类型多样, 有晶粒白云岩、含膏白云岩和藻白云岩等。储集空间类型也具有多样性, 有溶蚀孔洞、晶间孔和膏溶铸模孔等。随着岩溶时间的持续, 后期的机械充填作用和化学胶结作用影响着这类储层的优劣。断裂的发育展布影响了白云岩岩溶作用的规模与深度, 也为后期的热液改造提供了良好通道。

3) 断控深埋改造型

以断裂特别是走滑断层为运移通道的热液活动是这类储层形成的关键因素。典型的断控深埋改造型储层有四川盆地中二叠统茅口组-栖霞组及塔里木盆地

奇格布拉克组等。储层岩石主要有晶粒白云岩、颗粒(幻影)白云岩和斑状云灰岩等。储集空间有裂缝、溶蚀孔洞、晶间孔和粒间孔。除了热液白云岩化和溶蚀作用外, 原始的储集性能影响着这类储层的发育程度。热液流体类型与变化影响了断裂带的溶蚀与胶结作用方式, 决定了这类储层的形成与保持。

4) 深埋生烃溶蚀型

该类白云岩储层主要赋存于烃源层系之中, 常常富含有机质、粘土矿物和蒸发岩类矿物。目前所见主要以湖相泥页岩层中的泥晶白云石为主, 储集空间主要为白云石晶间孔和晶间溶孔。储集空间分别形成于准同生期的白云岩化作用与生油以及油气转化过程中大量 CO_2 和有机酸的溶蚀作用, 储集空间的保持得益于烃类流体的充注和长期的弱酸性环境。深埋生烃溶蚀型储层的典型代表如江汉盆地的潜江组及准噶尔盆地乌尔禾地区的凤城组等。

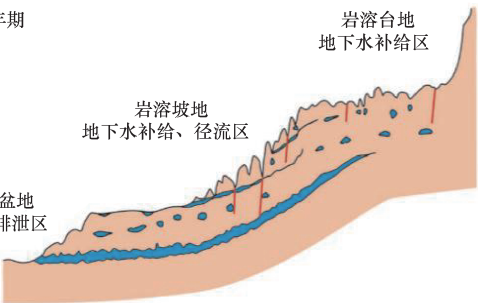
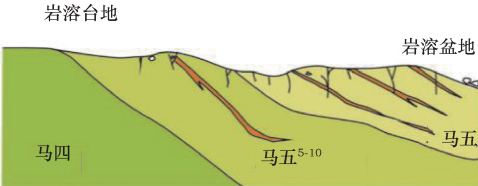
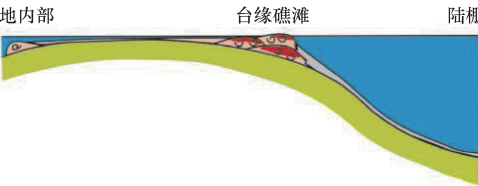
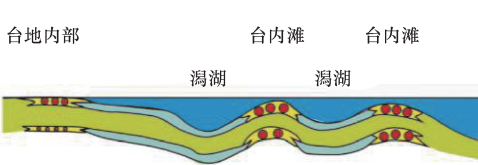
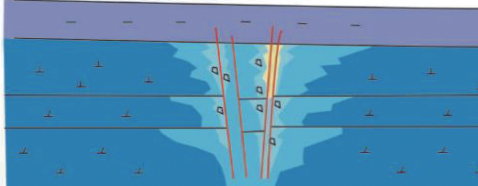
储层类型	形成模式	储层特征	形成机制	分布地区
面控表生岩溶型	a. 青壮年期 	晶粒白云岩、藻白云岩, 孔-洞-缝体系	岩溶作用、回流渗透白云岩化作用	塔里木盆地牙-哈气田寒武系-奥陶系、任丘油田蓟县系
	b. 中老年期 	晶粒白云岩, 铸模孔-裂缝	岩溶作用、萨布哈白云岩化作用、回流渗透白云岩化作用	鄂尔多斯盆地马家沟组
相控准同生溶蚀型	c. 台缘礁(丘)滩 	颗粒、礁白云岩, 粒间(溶)孔、粒内(溶)孔、晶间孔	回流渗透白云岩化作用、准同生期溶蚀作用	川东北地区二叠系
	d. 缓坡滩 	颗粒白云岩, 粒间(溶)孔、粒内(溶)孔	回流渗透白云岩化作用、准同生期溶蚀作用	四川盆地安岳地区龙王庙组
断控深埋改造型	e. 埋藏期断控热液白云岩化 	晶粒/颗粒白云岩, 晶间孔、溶孔	热液白云岩化作用、溶蚀作用	塔里木盆地顺南地区奥陶系、四川盆地中二叠统

图 3 中国主要白云岩储层形成模式与分布

Fig. 3 Evolution model and distribution of major dolomite reservoirs in China

3.3 储层发育与保持机理

笔者在对中国典型深层-超深层碳酸盐岩储层系统分析的基础上, 尝试提出了构造、层序、岩相、流体和时间五因素控储的概念模型^[12]。白云岩储层作为碳酸盐岩储层的重要类型, 当然也受这些因素所控制。

- 1) 构造对白云岩储层形成展布的控制, 一方面体现在构造对原始沉积格局的控制, 影响了有利相带和白云岩的分布; 另一方面体现在构造对后期变形的影响, 为后期改善白云岩储集性能的流体活动提供了构造背景和通道。
- 2) 层序为白云岩及储层分布提供了宏观沉积-成

岩环境,不同级次的层序界面分别控制了溶蚀作用的发生。

3) 岩相及其组合是白云岩储层形成的基础,普光和安岳气田白云岩储层离不开原始的礁滩沉积环境,靖边气田马家沟组储层得益于含膏云坪有关沉积环境。

4) 流体包括白云岩化流体和溶蚀流体等,流体性质包括海水、大气降水和热液等,所有白云岩储层的形成和保持都存在特殊的岩石与流体相互作用。

5) 时间是指白云岩储层从沉积到成岩改造再到最终成储并长期保持的全过程,涉及各种地质作用的过程和相互之间的配置关系。

在白云岩储层形成和保持过程中,既有同期的联合作用,也有多期的复合作用,这些作用的差异造成了白云岩储层发育展布的多样性。从沉积—成储—保持,符合“三元控储”模式所揭示的总体规律^[78]。

4 结论

1) 中国是世界上少有的几乎每个地质时代都有白云岩分布的国家。从元古宇到第四纪,各个层系都能见到各种类型白云岩(石);但层位和区域上分布极度不均,类型上也有明显差异。其中,下古生界白云岩分布最为普遍,上古生界、中生界和新生界仅有局部地区发育白云岩。

2) 中国白云岩的类型和与之对应的白云岩化作用丰富多彩,主要有微生物(生物)白云岩化、萨布哈白云岩化、回流渗透白云岩化、热液白云岩化、混合水白云岩化和埋藏白云岩化。由于白云岩化作用是一个持续或断续的、复杂的过程,即使同一层系的白云岩也会经历多期次、多类型白云岩化作用的叠加改造。

3) 白云岩是中国重要的油气储层,其类型多、时间跨度大。在深层和古老海相层系之中,白云岩比灰岩更易于形成优质的油气储层,其重要性显得尤为突出。在晚古生代和中、新生代形成的湖相白云岩也具有很好的储集性能,是非常规油气的重要赋存场所。白云岩储层形成和保持受构造、层序、岩相、流体和时间五因素的联合—复合作用所控制,这些因素和成储作用的差异,造就了白云岩储层发育展布的多样性。白云岩储层按照主控因素可以大致分为4种基本类型:相控准同生溶蚀型、面控表生溶蚀型、断控深埋改造型和深埋生烃溶蚀型。

中国白云岩与白云岩储层的研究方兴未艾。随着油气勘探向纵深展开,会有越来越多的科学与油气新

发现涌现出来。在深层、超深层白云岩领域,中国油气界已经成功发现并开发了深度大于7 000 m的白云岩气田,在深度大于8 000 m的白云岩地层中见到了优质白云岩储层和良好的油气显示。可以预见,在塔里木和四川盆地深度大于9 000 m甚至10 000 m的白云岩地层中也会有令人惊喜的油气发现。在中国海相白云岩领域油气勘探开发迅速展开的同时,针对中国陆相白云岩的勘探与研究也获得了多点突破,部分盆地中的湖湘白云岩是勘探开发页岩油、致密油的目的层,有望为中国未来的“陆相页岩油革命”增砖添瓦,作出不可或缺贡献。

致谢:本文是一篇尝试概述中国白云岩与白云岩储层的粗浅之作,受作者的阅历和积淀所限,难免挂一漏万。本文成文与本专辑的编辑得益于几代碳酸盐岩沉积储层学者的艰苦卓绝的探索和努力,得益于几大油公司丰富的勘探开发成果,得益于几次碳酸盐岩储层学术会议上国内外众多学者的精彩报告以及作者与他们面对面的深入讨论交流。三位评审专家为本文的完善提供了有益的建议,郝运轻博士和李朋威博士为本文提供了部分岩石薄片,在此一并表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] Burns S J, McKenzie J A, Vasconcelos C. Dolomite formation and biogeochemical cycles in the Phanerozoic[J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (S1): 49–61.
 - [2] Warren J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1–3): 1–81.
 - [3] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal[J]. *Geological Society London Special Publications*, 2004, 235(1): 7–63.
 - [4] McKenzie J A, Vasconcelos C. Dolomite mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: Historical developments and new perspectives[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(1): 205–219.
 - [5] Tucker M E, Wright V P. Carbonate sedimentology[M]. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 1990: 365–396.
 - [6] Sun S Q. Dolomite reservoirs: Porosity evolution and reservoir characteristics[J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(2): 186–204.
 - [7] Qing H, Bosence D W J, Rose E P F. Dolomitization by penesaline sea water in Early Jurassic peritidal platform carbonates, Gibraltar, western Mediterranean[J]. *Sedimentology*, 2001, 48(1): 153–163.
 - [8] 马永生, 蔡勋育. 四川盆地川东北区二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(6): 741–750.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu. Exploration achievements and prospects of the Permian-Triassic natural gas in northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(6): 741–750.

- [9] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气形成与富集规律[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(7): 910–926.
Jin Zhijun. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate strata in Chinese sedimentary basins[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(7): 910–926.
- [10] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系–寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278–293.
Zou Caineng, Du Jinhu, Xu Chunhui, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278–293.
- [11] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 181–192.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 181–192.
- [12] 何治亮, 张军涛, 丁茜, 等. 深层–超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 633–644.
He Zhiliang, Zhang Juntao, Ding Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 633–644.
- [13] 赵文智, 沈安江, 胡安平, 等. 塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探[J]. 岩石学报, 2015, 31(11): 3495–3508.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Anping, et al. A discussion on the geological background of marine carbonate reservoirs development in Tarim, Sichuan and Ordos Basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(11): 3495–3508.
- [14] 于炳松, 董海良, 蒋宏忱, 等. 青海湖底沉积物中球状白云石集合体的发现及其地质意义[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 66–70.
Yu Bingsong, Dong Hailiang, Jiang Hongchen, et al. Discovery of spheric dolomite aggregations in sediments from the bottom of Qinghai Lake and its significance for dolomite problem [J]. Geoscience, 2007, 21(1): 66–70.
- [15] 姜文英, 吴海斌, 储国强, 等. 内蒙古巴彦查干湖白云石的成因及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2010, 30(6): 1116–1120.
Jiang Wenying, Wu Haibin, Chu Guoqiang, et al. Origin of dolomite in Lake Bayanchagan, Inner Mongolia and its palaeoclimatic implications[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(6): 1116–1120.
- [16] 曲高生. 西沙群岛琛航岛碳酸盐沉积物 X 射线定量分析方法研究[J]. 矿物学报, 1990, 10(4): 360–369.
Qu Gaosheng. Quantitative X-ray diffraction analysis of carbonate sediments from Chenhang Island, Xisha Islands, China—A methodological study[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1990, 10(4): 360–369.
- [17] 廖静, 董兆雄, 翟桂云, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组一段下亚段湖相白云岩及其与海相白云岩的差异[J]. 海相油气地质, 2008, 13(1): 18–24.
Liao Jing, Dong Zhaoxiong, Di Guiyun, et al. Feature of Oligocene Shahejie Lower-1st Member lacustrine dolostone in Qikou Depression, Bohaiwan Basin, and difference of it from marine dolostone[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(1): 18–24.
- [18] 黄杏珍, 邵宏舜, 闫存凤, 等. 泌阳凹陷下第三系湖相白云岩形成条件[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 207–213.
Huang Xingzhen, Shao Hongshun, Yan Cunfeng, et al. Sedimentary condition of lacustrine dolomite in the Lower Tertiary Biyang Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 207–213.
- [19] 吴世强, 陈凤玲, 姜在兴, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组白云岩成因[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): (待刊).
Wu Shiqiang, Chen Fengling, Jiang Zaixing, et al. Origin of Qianjiang Formation dolostone in Qianjiang Sag, Jianghan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): (in press).
- [20] 黄成刚, 袁剑英, 田光荣, 等. 柴西地区始新统湖相白云岩储层地球化学特征及形成机理[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 230–242.
Huang Chenggang, Yuan Jianying, Tian Guangrong, et al. The geochemical characteristics and formation mechanism of the Eocene lacustrine dolomite reservoirs in the Western Qaidam [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 230–242.
- [21] 李亚林, 黄永建, 王成善, 等. 西藏措勤盆地白垩系白云岩地球化学特征及其成因分析[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 609–615.
Li Yalin, Huang Yongjian, Wang Chengshan, et al. Geochemical characteristics and genetic analysis of the Cretaceous dolomite in the Cuoqin Basin, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(3): 609–615.
- [22] 文华国, 郑荣才, 青 Hairuo, 等. 青藏高原北缘酒泉盆地青西凹陷白垩系湖相热水沉积原生白云岩[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(4): 591–604.
Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Qing Hairuo, et al. Primary dolostone related to the Cretaceous lacustrine hydrothermal sedimentation in Qingxi sag, Jiuquan Basin on the northern Tibetan Plateau [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2014, 44(4): 591–604.
- [23] 王国栋, 程日辉, 王璞瑶, 等. 松辽盆地嫩江组白云岩形成机理——以松科1井南孔为例[J]. 地质学报, 2008, 82(1): 48–54.
Wang Guodong, Cheng Rihui, Wang Puyao, et al. The forming mechanism of dolostone of Nenjiang Formation in Songliao Basin—Example from CCSD-SK II [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(1): 48–54.
- [24] 陈志鹏, 任战利, 于春勇, 等. 银额盆地哈日凹陷下白垩统热水沉积岩特征及成因[J]. 地球科学, 2018, 43(6): 129–144.
Chen Zhipeng, Ren Zhanli, Yu Chunyong, et al. Characteristics and genetic analysis of hydrothermal sediment of Lower Cretaceous in Hari Depression, Yin'e Basin [J]. Earth Science, 2018, 43(6): 129–144.
- [25] 万友利, 王剑, 付修根, 等. 羌塘盆地南坳陷中侏罗统布曲组白云岩储层成因流体同位素地球化学示踪[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): (待刊).
Wan Youli, Wang Jian, Fu Xiugen, et al. Geochemical tracing of isotopic fluid of dolomite reservoir in the Middle Jurassic Buqu Formation in southern Depression of Qiangtang Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): (in press).
- [26] 谭秀成, 罗冰, 李凌, 等. 碳酸盐岩台地多旋回沉积小层精细划分对比方法研究——以川中磨溪构造嘉二段为例[J]. 地层学杂志, 2008, 32(2): 207–212.
Tan Xiucheng, Luo Bing, Li Ling, et al. Fine subdivision and correlation of multi-cycle carbonate platform successions: A case study of the second member of the Jialingjiang Formation in the Moxi Structure,

- central Sichuan Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2008, 32(2): 207–212.
- [27] 冯有良, 张义杰, 王瑞菊, 等. 准噶尔盆地西北缘风城组白云岩成因及油气富集因素[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6): 685–692.
- Feng Youliang, Zhang Yijie, Wang Ruiju, et al. Dolomites genesis and hydrocarbon enrichment of the Fengcheng Formation in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 685–692.
- [28] 胡俊杰, 李琦, 汪双清, 等. 羌塘盆地角木茶卡地区展金组白云岩岩石学及地球化学特征[J]. *岩性油气藏*, 2014, 26(5): 80–85, 118.
- Hu Junjie, Li Qi, Wang Shuangqing, et al. Petrological and geochemical characteristics of dolomite of Zhanjin Formation in Jiaomuchaka area, Qiangtang Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(5): 80–85, 118.
- [29] 阎凤存, 袁剑英. 武威盆地石炭系沉积环境及含油气远景[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(2): 267–274.
- Yan Fengcun, Yuan Jianying. Sedimentary environment and hydrocarbon potential of carboniferous in Wuwei Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(2): 267–274.
- [30] 谢增业, 张本健, 杨春龙, 等. 川西北地区泥盆系天然气沥青地球化学特征及来源示踪[J]. *石油学报*, 2018, 39(10): 1103–1118.
- Xie Zengye, Zhang Benjian, Yang Chunlong, et al. Geochemical characteristics and source trace of the Devonian natural gas and bitumen in northwest Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(10): 1103–1118.
- [31] 马青, 王振宇, 王兴志, 等. 塔里木盆地中部石炭系生屑灰岩储集层特征及评价[J]. *新疆石油地质*, 2001, 22(5): 400–404.
- Ma Qing, Wang Zhenyu, Wang Xingzhi, et al. Reservoir characteristics and evaluation of carboniferous bioclastic limestone in central Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2001, 22(5): 400–404.
- [32] 谢全民, 李锋, 马彩琴. 酒西盆地鸭儿峡油田志留系潜山油藏地质特征及油水分布[J]. *特种油气藏*, 2001, 8(4): 5–7.
- Xie Quanmin, Li Feng, Ma Caiqin. Geological characteristics and distribution of oil and water in Silurian buried hill reservoir in Yaerxia oilfield, Jiuxi Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2001, 8(4): 5–7.
- [33] 李华, 范文玉, 张建龙, 等. 哀牢山成矿带南段长安金矿控矿因素及其找矿指示意义[J]. *地质找矿论丛*, 2017, 32(4): 535–543.
- Li Hua, Fan Wenyu, Zhang Jianlong, et al. Ore-controlling factors of the Chang'an gold deposit in southern Ailaoshan metallogenic belt and its prospecting significance[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2017, 32(4): 535–543.
- [34] 何莹, 鲍志东, 沈安江, 等. 塔里木盆地牙哈—英买力地区寒武系一下奥陶统白云岩形成机理[J]. *沉积学报*, 2006, 24(6): 806–818.
- He Ying, Bao Zhidong, Shen Anjiang, et al. The genetic mechanism of dolostones of the Cambrian-Lower Ordovician in Yaha-Yingmaili region, Tarim Basin: Dolomitization through deep buried hydrothermal fluid[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(6): 806–818.
- [35] 黄正良, 包洪平, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系马家沟组白云岩特征及成因机理分析[J]. *现代地质*, 2011, 25(5): 925–930.
- Huang Zhengliang, Bao Hongping, Ren Junfeng, et al. Characteristics and genesis of dolomite in Majiagou Formation of Ordovician, south of Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 2011, 25(5): 925–930.
- [36] 孙海涛, 张玉银, 柳慧林, 等. 四川盆地东部下寒武统龙王庙组白云岩类型及其成因[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 318–329.
- Sun Haitao, Zhang Yuyin, Liu Huilin, et al. Typological analysis and genetic mechanism of dolomite in the Lower Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 318–329.
- [37] 何金有, 徐备, 孟祥英, 等. 新疆库鲁克塔格地区新元古代层序地层学研究及对比[J]. *岩石学报*, 2007, 23(7): 1645–1654.
- He Jinyou, Xu Bei, Meng Xiangying, et al. Neoproterozoic sequence stratigraphy and correlation in Qurqutagh area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(7): 1645–1654.
- [38] 官开萍, 田力, 安志辉, 等. 湖北神农架西部南华纪地层序列及其区域对比[J]. *地质前缘*, 2016, 23(6): 236–245.
- Guan Kaiping, Tian Li, An Zhihui, et al. Stratigraphic succession of the Nanhuan Period in the Shennongjia area in western Hubei and its regional correlation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(6): 236–245.
- [39] 刘梦儒. 中祁连山东段的晚元古代地层[J]. *地质通报(中国区域地质)*, 1994, (2): 106–114.
- Liu Mengru. Late Proterozoic strata in the eastern sector of the central Qilian Mountains[J]. *Geological Bulletin of China(Regional Geology of China)*, 1994, (2): 106–114.
- [40] 旷红伟, 柳永清, 范正秀, 等. 扬子克拉通北缘中元古界神农架群沉积特征[J]. *古地理学报*, 2018, 20(4): 523–544.
- Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Fan Zhengxiu, et al. Sedimentary characteristics of the Mesoproterozoic Shennongjia Group in northern margin of Yangtze Craton[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(4): 523–544.
- [41] 常向阳, 朱炳泉. 东川铜矿同位素地球化学研究: (I) 地层年代与铅同位素化探应用[J]. *地球化学*, 1997, 26(2): 32–38.
- Chang Xiangyang, Zhu Bingquan. Isotope geochemistry study of Dongchuan copper deposits in Middle Yunnan Province, SW China: (I) Stratigraphic chronology and application of geochemical exploration by lead isotopes[J]. *Geochimica*, 1997, 26(2): 32–38.
- [42] 张明洋. 天津蓟县剖面古元古界长城群的层序地层划分及其相关沉积学问题研究[D]. 中国地质大学(北京), 2012.
- Zhang Mingyang. The research of sequence stratigraphy and sedimentology of Paleoproterozoic Changcheng Group, Tianjin Jixian section[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2012.
- [43] 钟华, 马永生. 五台山滹沱群早元古代白云岩氧同位素地球化学研究[J]. *地球化学*, 1995, 24(S1): 83–91.
- Zhong Hua, Ma Yongsheng. Oxygen isotope geochemistry of Early Proterozoic Hutuo Group dolomites, Wutaishan Mountain area[J]. *Geochimica*, 1995, 24(S1): 83–91.
- [44] 陈威宇, 陈衍景. 大氧化事件在山西滹沱群中的记录: 碳酸盐岩碳同位素资料分析[J]. *岩石学报*, 2018, 34(12): 3709–3720.
- Chen Weiyu, Chen Yanjing. Records of the Great Oxidation Event in

- the Hutuo Group, Shanxi, China: A reassessment of the $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ data [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(12): 3709–3720.
- [45] 乔桂林, 赵永强, 沙旭光, 等. 塔里木盆地塔中隆起南坡油气勘探领域[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(5): 630–637, 647.
- Qiao Guilin, Zhao Yongqiang, Sha Xuguang, et al. Oil and gas exploration domains on the southern slope of Central Tarim Uplift, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(5): 630–637, 647.
- [46] 熊连桥, 姚根顺, 倪超, 等. 川西北地区中泥盆统观雾山组储集层特征、控制因素与演化[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(7): 1031–1042.
- Xiong Lianqiao, Yao Genshun, Ni Chao, et al. Characteristics, controlling factors and evolution of the Middle Devonian Guanwushan Formation reservoirs in Longmenshan area, northwestern Sichuan, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(7): 1031–1042.
- [47] 银河, 王亚辉, 刘娟, 等. 中国南海西沙地区西科1井中新统梅山组白云岩特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): (待刊).
- Yin He, Wang Yahui, Liu Juan, et al. Characteristics and origin of dolostones in the Miocene Meishan Formation in Well Xike-1, Xisha Islands, South China Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): (in press).
- [48] You X, Shu S, Zhu J, et al. Microbially mediated dolomite in Cambrian stromatolites from the Tarim Basin, northwest China: Implications for the role of organic substrate on dolomite precipitation [J]. *Terra Nova*, 2013, 25(5): 387–395.
- [49] 陈娅娜, 沈安江, 潘立银, 等. 微生物白云岩储集层特征、成因和分布——以四川盆地震旦系灯影组四段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(5): 704–715.
- Chen Yana, Shen Anjiang, Pan Liyin, et al. Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: A case study of 4th Member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 704–715.
- [50] 李红, 柳益群, 李文厚, 等. 新疆乌鲁木齐二叠系湖相微生物白云岩成因[J]. *地质通报*, 2013, 32(4): 661–670.
- Li Hong, Liu Yiqun, Li Wenhui, et al. The microbial precipitation of lacustrine dolomite from Permian Formation, Urumqi, Xinjiang, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(4): 661–670.
- [51] 董小波, 牛永斌. 豫西北奥陶系马家沟组三段豹斑灰岩的生物潜穴成因及成岩演化[J]. *现代地质*, 2015, 29(4): 833–843.
- Dong Xiaobo, Niu Yongbin. Biological burrow explanation of leopard limestone and its diagenetic evolution in the third member of Majiagou Formation in Ordovician, northwest of Henan Province [J]. *Geoscience*, 2015, 29(4): 833–843.
- [52] 邵龙义, 何宏, 彭苏萍, 等. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系及奥陶系白云岩类型及形成机理[J]. *古地理论*, 2002, 4(2): 19–30.
- Shao Longyi, He Hong, Peng Suping, et al. Types and origin of dolostones of the Cambrian and Ordovician of Bachu Uplift area in Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(2): 19–30.
- [53] 张军涛, 何治亮, 岳小娟, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段富铁白云石成因[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 776–783.
- Zhang Juntao, He Zhiliang, Yue Xiaojuan, et al. Genesis of iron-rich dolostones in the 5th member of the Majiagou Formation of the Ordovician in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 776–783.
- [54] 陈琪, 胡文瑄, 李庆, 等. 川东北盘龙洞长兴组—飞仙关组白云岩化特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(1): 84–93.
- Chen Qi, Hu Wenxuan, Li Qing, et al. Characteristics and genesis of dolomitization in Changxing and Feixianguan Formations in Panlongdong, northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(1): 84–93.
- [55] 唐雪松, 谭秀成, 刘宏, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组白云岩及云质硅岩储层特征与发育规律[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 731–743.
- Tang Xuesong, Tan Xiucheng, Liu Hong, et al. Characteristics and development mechanism of dolomite and dolomitic quartzite reservoirs of the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 731–743.
- [56] 张涛, 林娟华, 韩月卿, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液白云岩发育模式及对储层的改造[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): (待刊).
- Zhang Tao, Lin Juanhua, Han Yueqing, et al. Pattern of hydrothermal dolomitization in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, and its alteration on reservoirs herein [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): (in press).
- [57] 焦存礼, 何治亮, 邢秀娟, 等. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 277–284.
- Jiao Cunli, He Zhiliang, Xing Xiujuan, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 277–284.
- [58] 宋光永, 刘树根, 黄文明, 等. 川东南丁山—林滩场构造灯影组热液白云岩特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(6): 706–715.
- Song Guangyong, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Characteristics of hydrothermal dolomite of Upper Sinian Dengying Formation in the Dingshan-Lintanchang structural zone, Sichuan Basin, China [J]. *Journal Of Chengdu University Of Technology(Science & Technology Edition)*, 2009, 36(6): 706–715.
- [59] 柳益群, 李红, 朱玉双, 等. 白云岩成因探讨: 新疆三塘湖盆地发现二叠系湖相喷流型热水白云岩[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 861–867.
- Liu Yiqun, Li Hong, Zhu Yushuang, et al. Permian lacustrine eruptive hydrothermal dolomites, Santanghu Basin, Xinjiang Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 861–867.
- [60] 钟大康, 姜振昌, 郭强, 等. 内蒙古二连盆地白音查干凹陷热水沉积白云岩的发现及其地质与矿产意义[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4): 587–595.
- Zhong Dakang, Jiang Zhenchang, Guo Qiang, et al. Discovery of hydrothermal dolostones in Baiyinchagan sag of Erlian Basin, Inner Mongolia, and its geologic and mineral significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 587–595.
- [61] 田景春, 林小兵, 张翔, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组滩相白云岩多重成因机理及叠加效应[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 679–686.
- Tian Jingchun, Lin Xiaobing, Zhang Xiang, et al. The genetic mecha-

- nism of shoal facies dolomite and its additive effect of Permian Qixia Formation in Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30 (3): 679–686.
- [62] 钱一雄, 尤东华. 塔中地区西北部奥陶系白云岩(化)成因分析[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(2): 146–150.
- Qian Yixiong, You Donghua. An analysis of Ordovician dolomitisation origin in northwestern Tazhong area [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(2): 146–150.
- [63] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛, 等. 塔里木盆地地下奥陶统白云岩化流体来源的地球化学分析[J]. *地学前缘*, 2008, 15(2): 80–89.
- Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao, et al. Geochemical analyses on dolomitizing fluids of Lower Ordovician carbonate reservoir in Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 80–89.
- [64] 金振奎, 冯增昭. 滇东—川西下二叠统白云岩的形成机理——玄武岩淋滤白云化[J]. *沉积学报*, 1999, 17(3): 383–389.
- Jin Zhenkui, Feng Zengzhao. Origin of dolostones of the Lower Permian in East Yunnan-West Sichuan—Dolomitization through leaching of basalts [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(3): 383–389.
- [65] 胡忠贵. 川东邻水—渝北地区石炭系黄组白云岩成因[J]. *岩石学报*, 2008, 24(6): 1369–1378.
- Hu Zhonggui. Dolomite genesis of Huanglong Formation of carboniferous in Linshui of eastern Sichuan-northern Chongqing area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(6): 1369–1378.
- [66] 陈代钊. 构造—热液白云岩化作用与白云岩储层[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(5): 614–622.
- Chen Daizhao. Structure-controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(5): 614–622.
- [67] 舒晓辉, 张军涛, 李国蓉, 等. 四川盆地北部栖霞组—茅口组热液白云岩特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 442–448.
- Shu Xiaohui, Zhang Juntao, Li Guorong, et al. Characteristics and genesis of hydrothermal dolomites of Qixia and Maokou Formations in northern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 442–448.
- [68] 何自新, 郑聪斌, 王彩丽, 等. 中国海相油气田勘探实例之二: 鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探[J]. *海相油气地质*, 2005, 10(2): 37–44.
- He Zixin, Zheng Congbin, Wang Caili, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 2): Jingbian gas field, Ordos Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2005, 10(2): 37–44.
- [69] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 268–277.
- Du Jinhu, Zou Caineng, Xu Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 268–277.
- [70] 马永生, 郭旭升, 郭彤楼, 等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J]. *地质论评*, 2005, 51(4): 477–480.
- Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Guo Tonglou, et al. Discovery of the large-scale Puguang gas field in the Sichuan Basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting [J]. *Geological Review*, 2005, 51(4): 477–480.
- [71] 马永生. 中国海相油气田勘探实例之六: 四川盆地普光大气田的发现与勘探[J]. *海相油气地质*, 2006, 11(2): 35–40.
- Ma Yongsheng. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 6): Puguang gas field in Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2006, 11(2): 35–40.
- [72] 罗志立, 刘顺, 徐世琦, 等. 四川盆地震旦系含气层中有利勘探区块的选择[J]. *石油学报*, 1998, 19(4): 12–18, 4.
- Luo Zhili, Liu Shun, Xu Shiqi, et al. Selection of favorable area of exploration in Sinian bearing gas formation of Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(4): 12–18, 4.
- [73] 吴世祥, 李宏涛, 龙胜祥, 等. 川西雷口坡组碳酸盐岩储层特征及成岩作用[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(4): 542–550, 559.
- Wu Shixiang, Li Hontao, Long Shengxiang, et al. A study on characteristics and diagenesis of carbonate reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(4): 542–550, 559.
- [74] 杨威, 王清华, 赵仁德, 等. 和田河气田奥陶系碳酸盐岩裂缝[J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(3): 252–255.
- Yang Wei, Wang Qinghua, Zhao Rende, et al. Fractures of Ordovician carbonate rocks in Hetian River gasfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(3): 252–255.
- [75] 赵贤正, 金凤鸣, 王余泉, 等. 冀中坳陷长洋淀地区“古储古堵”潜山成藏模式[J]. *石油学报*, 2008, 29(4): 489–493.
- Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Wang Yuquan, et al. Buried-hill reservoir-forming mode of “old reservoir-old sealing formation” in Changyangdian area of Jizhong Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(4): 489–493.
- [76] Zhu D, Meng Q, Jin Z, et al. Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim Basin, northwestern China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 232–244.
- [77] He Z, Ding Q, Wo Y, et al. Experiment of carbonate dissolution: Implication for high quality carbonate reservoir formation in deep and ultradeep basins [J]. *Geofluids*, 2017, 2017(2): 1–8.
- [78] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式——以四川普光气田为例[J]. *地质学报*, 2010, 84(8): 1087–1094.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: A case study from the Puguang oilfield in Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(8): 1087–1094.

(编辑 李 军)