

### 白云岩一蒸发岩共生体系研究进展及展望

文华国, 霍飞, 郭佩, 甯濛, 梁金同, 钟怡江, 苏中堂, 徐文礼, 刘四兵, 温龙彬, 蒋华川

引用本文:

文华国, 霍飞, 郭佩, 等. 白云岩一蒸发岩共生体系研究进展及展望[J]. 沉积学报, 2021, 39(6): 1319–1343. WEN HuaGuo, HUO Fei, GUO Pei, et al. Advances and Prospects of Dolostone–evaporite Paragenesis System[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(6): 1319–1343.

### 相似文章推荐(请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 川东北地区下寒武统龙王庙组白云岩成因分析

Genesis of Dolomite in the Lower Cambrian Longwangmiao Formation, Northeastern Sichuan Basin 沉积学报. 2020, 38(6): 1284–1295 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000–0550.2019.108

### 四川盆地震旦系灯影组白云岩成因

Genesis of Dolomite in the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin 沉积学报. 2019, 37(3): 443–454 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000–0550.2018.148

### 鄂尔多斯盆地中南部马五1-2亚段岩相古地理特征及其对储层的影响

Characteristics of Lithofacies Paleogeography and Its Effect on the Majiagou Submember 51-2 Reservoir in the Central-southern Ordos Basin

沉积学报. 2019, 37(3): 589-600 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.141

### 塔里木盆地顺南501井鹰山组白云岩储层特征与成因

Characteristics and Genesis of Dolomite Reservoirs in the Yingshan Forma-tion of Well SN501 in the Tarim Basin 沉积学报. 2018, 36(6): 1206-1217 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.092

### 滨里海盆地东缘北特鲁瓦地区白云岩特征及其储层发育机制

Characteristics and Development Mechanism of Dolomite Reservoirs in North Truva of Eastern Pre-Caspian Basin 沉积学报. 2016, 34(4): 747-757 https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.04.015

文章编号:1000-0550(2021)06-1321-23

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.141

# 白云岩一蒸发岩共生体系研究进展及展望

文华国<sup>1,2,3</sup>,霍飞<sup>1,2,3</sup>,郭佩<sup>1,2,3</sup>,甯濛<sup>1,2,3</sup>,梁金同<sup>1,2,3</sup>,钟怡江<sup>1,2,3</sup>,苏中堂<sup>1,2,3</sup>,徐文礼<sup>1,2,3</sup>,刘四兵<sup>2,3</sup>,温龙彬<sup>1,2,3</sup>,蒋华川<sup>1,2,3</sup> 1.成都理工大学沉积地质研究院,成都 610059 2.油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学),成都 610059 3.中石油集团碳酸盐岩储层重点实验室成都理工大学分室,成都 610059

摘 要 白云岩—蒸发岩共生体系在全球范围内分布广泛,在前寒武纪至第四纪地层中均有发现,然而该共生体系的发育机理 及控制因素目前研究薄弱,亟待厘清。在调研国内外大量文献的基础上,结合研究团队对国内白云岩—蒸发岩共生体系的已有 研究,系统总结了白云岩—蒸发岩共生体系发育特征及组合类型,并进一步探讨了其形成机制。在此基础上,明确了白云岩— 蒸发岩共生体系的研究意义,并提出目前白云岩—蒸发岩共生体系研究存在的问题及下一步研究方向。首先,通过梳理全球范 国内已报道的各地质历史时期白云岩—蒸发岩共生体系的特征,发现白云岩—蒸发岩共生体系广泛分布于全球51个地区,以北 半球为主,且亚洲分布最多;其次为欧洲和北美洲,非洲分布相对较少;此外在南美洲及大洋洲也有零星分布;共生体系分布层 位众多,从前寒武系到第四系均有分布,以二叠系居多。总结了蒸发岩与白云岩共生组合方式的5种类型;白云岩与蒸发岩互 层、厚层白云岩上覆于厚层蒸发岩、厚层蒸发岩上覆于厚层白云岩、厚层白云岩夹薄层蒸发岩、厚层蒸发岩夹薄层白云岩,并探 讨了共生差异的形成过程、分布规律、主要控制因素以及共生体系发育的特殊性和普遍性规律。其次,在全球共生体系矿物类 型、特征精细表征基础之上,由宏观现象分析向微观机理解释转变,并划分出共生体系中6种蒸发岩和5种白云岩类型,初步分 析了共生体系特征及成因。最后,总结了白云岩—蒸发岩共生体系中成岩流体的性质、特征、来源及流体演化路径。对白云岩 —蒸发岩共生体系的研究不仅为解决"白云岩(白云石)问题"提供了新的思路,也将推动对白云岩—蒸发岩共生体系重要基础 地质问题的认识,并为共生体系内油气资源勘探提供理论指导。

关键词 白云岩;蒸发岩;共生关系;形成机制;主控因素;研究进展;展望

第一作者简介 文华国,男,1979年出生,博士,教授,碳酸盐岩沉积学,E-mial: wenhuaguo08@cdut.edu.cn

中图分类号 P588.24 文献标志码 A

### 0 引言

白云岩是由白云石[CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]形成的一类常 见碳酸盐岩<sup>[1]</sup>。理想的白云石晶体简单且高度有序, 由钙离子层和镁离子层交替与碳酸根离子层互层排 列组成。然而,如此常见的一种岩石,其成因却是困 扰地质学界200多年的"白云岩问题"<sup>[2]</sup>,它主要体现 在两个方面:一是白云岩在前寒武纪和古生代及中 生代地层中极其普遍,但在白云石过饱和的现代海 水中却十分罕见;二是在常温、无机实验室条件下, 白云石并不能直接沉淀<sup>[3]</sup>。因此很难通过"将今论 古"的地质思维来解释在地史时期具有广泛时空分 布的白云岩的成因。蒸发岩是由湖盆、海盆中的卤 水经蒸发、浓缩,盐类物质按照不同的溶解度结晶而 形成的一类化学沉积岩<sup>(4)</sup>,主要由氯化物(石盐、钾 盐、光卤石等)、硫酸盐(石膏、硬石膏、芒硝、无水芒 硝、杂卤石等)、硝酸盐(硝石等)、碳酸盐(苏打石、天 然碱等)和硼酸盐(硼砂等)等矿物组成<sup>(46)</sup>。通常沉 积蒸发岩的同时,也往往形成多种白云岩,这种伴生 现象在地层中呈规律性分布,形成了白云岩与蒸发 岩共生体系<sup>[7]</sup>。

白云岩—蒸发岩共生体系具有广泛的时空分布 特征,从前寒武纪至全新世均有发育,并且在全球尺 度可追踪。目前白云岩—蒸发岩共生体系(以下简

#### 收稿日期:2021-10-18;收修改稿日期:2021-11-11

基金项目:国家自然科学基金(41972109,42002116,42102136)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41972109,42002116, 42102136]

称共生体系)在古气候、古环境重建和油气勘探中扮 演着越来越重要的角色,并引起了国际上诸多学者 的关注[7-10]。如在白云岩一蒸发岩共生体系中已发现 了优越的储盖组合和丰富的油气资源,显示出很好 的勘探潜力,包括:桑托斯盆地、阿姆河盆地、西伯利 亚盆地等[11-12],国内的塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和 四川盆地等。尽管前期部分学者开展了相关的研 究,如共生体系中白云岩成因研究[13-14]、白云岩的油 气储集特征[1416]、蒸发岩形成过程[17]、储(白云岩)盖 (蒸发岩)组合对于油气储集的影响[18]、蒸发岩对于储 层的影响四、古气候变迁决定了共生组合序列及有利 的储集组合特征<sup>四</sup>等角度进行了讨论,但共生体系在 形成过程中受复杂的沉积-成岩条件影响,其时空 分布、沉积特征、矿物组合、地球化学特征、微生物作 用、流体来源、流体运移路径、流体驱动力、古气候记 录等系列科学问题有待深入研究和揭示。若能针对 共生体系开展系统研究,或许可以为解决"白云岩 (白云石)问题"提供新思路,也将推动对白云岩一蒸 发岩共生体系这一重要基础地质问题的揭示,同时 为共生体系内油气资源勘探取得突破提供指导。本 文在国内外大量文献调研的基础上,结合研究团队 对白云岩一蒸发岩共生体系的认识,探讨了白云岩 一蒸发岩共生关系的发育特征、成岩作用及流体特 征、形成过程、控制因素及研究意义,提出了该共生 体系研究存在的问题及下一步研究方向,并为未来 研究提供启示。

### 1 共生体系全球时空分布特征

对白云岩一蒸发岩共生体系的系统研究有助于 理解大陆、海洋(包括海水、沉积岩和玄武岩等)和大 气间长期物质循环。本次研究调研了全球范围内共 生体系相关资料,建立了相关数据库,开展了系统总 结对比,发现白云岩一蒸发岩共生现象在全球范围 内不同地质历史时期普遍存在,但目前共生体系的 研究仍处于初级阶段。本次研究发现的共生体系时 空分布特点如下:

已有文献报道的共生体系广泛分布于51个地 区,以北半球为主要分布区,且亚洲分布最多;其次 为欧洲和北美洲,非洲分布相对较少;此外在南美洲 及大洋洲也有零星分布(图1)。文献报道的共生体 系分布层位众多,从前寒武纪到第四纪均有分布,具 体如下。 (1)前寒武纪主要发育在亚洲,如中国四川盆地<sup>[20]</sup>、阿曼 Salt 盆地<sup>[21]</sup>、印度 Bikaner-Nagaur 盆地<sup>[22]</sup>,此外还有澳大利亚 Amadeus 盆地<sup>[23]</sup>和加拿大 Victoria岛<sup>[24]</sup>;

(2) 寒武纪大都发育于亚洲(图1),如中国四川 盆地<sup>[25-26]</sup>、塔里木盆地<sup>[27-28]</sup>、松辽盆地<sup>[29]</sup>、渤海湾盆地<sup>[30]</sup> 和阿曼 Salt 盆地<sup>[31]</sup>;

(3) 奧陶纪和志留纪数量明显减少,主要分布于 北美洲(图1,2),如美国 Williston 盆地<sup>[32]</sup>、美国 Northern lower Michigan<sup>[33]</sup>和加拿大 Michigan 盆地<sup>[34]</sup>, 其次在中国鄂尔多斯盆地<sup>[14,19,35]</sup>和澳大利亚 Carnarvon 盆地<sup>[36]</sup>也有分布;

(4) 泥盆纪和石炭纪共生体系分布同样较少,均 分布于北半球(图1,2),如加拿大 Alberta 盆地<sup>[37]</sup>、爱 尔兰 The Leinster Massif<sup>38]</sup>、哈萨克斯坦 Caspian 盆 地<sup>[39]</sup>和中国四川盆地<sup>[40]</sup>等;

(5) 二叠纪共生体系数量急剧增加,在全球范围 内有14个地区分布(图1,2),主要集中于欧洲和亚 洲,如德国Hessian盆地<sup>[41]</sup>、伊朗Zagros盆地<sup>[42]</sup>和中国 准噶尔盆地<sup>[43]</sup>等,其次在北美洲和南美洲也有少量分 布,如美国Oklahoma<sup>[44]</sup>和巴西Paraná Basin<sup>[45]</sup>等;

(6) 三叠纪和侏罗纪共生体系数量较二叠纪明显降低,全部分布于亚洲(图1,2),如中国四川盆地<sup>[46-47]</sup>、江汉盆地<sup>[48]</sup>和伊朗Salman Oil Field<sup>[49]</sup>等;

(7)白垩纪共生体系数量相对增加,主要分布于
 亚洲和非洲(图1,2),如伊朗Irankuh Mining
 District<sup>[50]</sup>、埃及The Gulf of Sue<sup>[51]</sup>、利比亚Kufra Basin<sup>[52]</sup>
 等,欧洲仅西班牙Camerous 盆地见相关报道<sup>[53]</sup>;

(8) 古近纪、新近纪和第四纪共生体系总体数量 较少,集中分布于欧洲和亚洲(图1,2),如土耳其Sivas 盆地<sup>[54]</sup>、西班牙 Baza 盆地<sup>[55]</sup>和中国柴达木盆地<sup>[56]</sup>等。

Warren<sup>177</sup>对新元古代以来全球蒸发岩沉积量与 全球板块构造旋回对比发现,显生宙以来的造山运 动、板块拼合以及初期的大陆裂解都形成了大量的蒸 发岩。这是因为地质历史时期的大量蒸发岩沉积通 常发生于海平面以下的坳陷内,而且水体必须局限。 据统计,地质历史时期蒸发岩大量发育的构造位 置<sup>177</sup>,主要分为以下四种:1)大陆裂谷,通常发生在威 尔逊旋回大陆开始裂解时期;2)大陆板块开始汇聚时 形成的前陆盆地;3)大陆或者板块内部的坳陷;4)在 转换或走滑构造背景下快速沉降的大陆地壳的局部 地方。这些构造位置可以发育大量的蒸发岩,但是否



Fig.1 Global distribution of the dolostone-evaporite paragenesis system



有利于形成白云岩与蒸发岩共生体系需进一步研究。 此外,值得注意的是,本次调研发现,相较于全 球其他地区,共生体系在四川盆地被报道的层位最 多(图1)。尽管共生体系蕴含着丰富的油气资源,但 目前专门研究各时期共生体系的报道极少,因此,有 必要系统开展各时期共生体系研究。

### 2 共生体系发育特征

### 2.1 共生体系的岩性组合序列

共生体系具有独特的岩性组合序列<sup>[7,57]</sup>,可划分 为五类(图3),包括:1)白云岩与蒸发岩互层,2)厚层 白云岩上覆于厚层蒸发岩,3)厚层蒸发岩上覆于厚 层白云岩,4)厚层白云岩夹薄层蒸发岩,5)厚层蒸发 岩夹薄层白云岩。

(1) 白云岩与蒸发岩互层:该类岩性组合是共生体系中最常见的一种(图3、图4a),主要受气候与海平面多期快速变化影响<sup>[7,20-21,24,59]</sup>。不同地区单个旋回因沉积环境、气候因素等具有不同特征,如加拿大Northwest Territories 地区 Ten Stone 组发育的白云岩与石膏互层,因低盐度海水的突然侵入显示出白云岩与蒸发岩的突变接触<sup>[22]</sup>,而在鄂尔多斯盆地靳2井下奥陶统马家沟组五段发育白云岩与膏盐岩互层,且向上膏盐岩含量逐渐增加序列,反映了气候逐渐变干旱<sup>[7]</sup>。

(2)厚层白云岩上覆于厚层蒸发岩(图3、图 4b):该类岩性组合可反映气候由干旱向潮湿迁移, 如四川盆地中三叠统雷口坡组依次出现膏盐岩、膏 云岩、藻云岩、藻灰岩组合序列,指示了气候的逐渐 潮湿过程<sup>[7]</sup>;也可能反映的是海水的淡化过程,如阿 曼南部Minassa-1井中沉积的一套共生组合,自下而 上由硬石膏逐渐向白云岩转变,表明同期海水盐度 逐渐降低<sup>[31]</sup>。

(3)厚层蒸发岩上覆于厚层白云岩(图3、图 4c):该类岩性组合的形成可分为两种情况,一种是 蒸发岩直接沉积于早期形成的白云岩上,如意大利 墨西拿地区沉积的共生体系由于地中海处于封闭环 境,随着海水蒸发,深水层硫酸盐的消耗量大于其注 入量,导致发育了一套下部白云岩、上部蒸发岩的沉 积序列<sup>[60]</sup>;另一种则是蒸发岩覆盖在灰岩上,后期发 生白云石化<sup>[42]</sup>。

(4) 厚层白云岩夹薄层蒸发岩:蒸发岩常呈薄层 状夹于白云岩中,或以胶结物、结核等形式发育在白 云岩裂缝中(图3、图4d,e)<sup>[15.59.62]</sup>。如四川盆地三叠系 嘉陵江组双15井发育于浅水局限台地的白云岩,其 发育的裂缝中常充填有薄层状石膏。

(5) 厚层蒸发岩夹薄层白云岩(图3、图4f):蒸

发岩中发育的白云岩可能由渗透回流作用形成,也可能由微生物诱导形成<sup>[7,63]</sup>。如四川盆地雷口坡组中46井中发育一套典型的蒸发岩夹白云岩组合,其顶底均为蒸发岩,中部夹薄层白云岩层,其主要由渗透回流作用形成;在塔里木盆地和田1井中寒武统 膏岩层段发现有原生球形白云石,研究推测为微生物诱导的原生白云石<sup>[64]</sup>,形成环境相较于蒸发岩更 为湿润。

### 2.2 共生体系中的蒸发岩发育特征

共生体系中的蒸发岩类主要包括石膏岩和盐岩 两种,根据其形态和结构特征可将石膏岩进一步划 分为5类:薄层状、块状、鸡笼铁丝状、结核状、角砾状 石膏岩,而盐岩主要为石盐。

(1)薄层状石膏:该类石膏呈薄层状或浪成波纹 状与薄层泥晶白云岩交替出现(图5a)。石膏单层厚 毫米一厘米级不等,其内少见生物化石或生物扰动 痕迹,表明该种高盐度环境不适合生物生长<sup>[65]</sup>。微观 尺度下,石膏晶体以聚集体的形式分布于深色富含 粘土白云岩的基质中,呈自形一半自形晶,石膏晶体 粒度一般在0.2~0.5 mm,有时呈聚片双晶(图5b),如 意大利南部 Messinian 阶<sup>[65]</sup>、澳大利亚 Amadeus Basin 新元古界 Gillen 组<sup>[66]</sup>和塔里木盆地寒武系等<sup>[6]</sup>。



A.白云岩与蒸发岩互层;B.厚层白云岩上覆于厚层蒸发岩;C.厚层蒸发岩上覆于厚层白云岩;D.厚层白云岩夹薄层蒸发岩;E.厚层蒸发岩夹薄层白云岩 Fig.3 Combination patterns of dolostone and evaporate (modified from references[7,42,58])



图4 白云岩一蒸发岩体系的典型岩性组合

(a) 白云岩与蒸发岩互层分布, 加拿大Northwest Territories 地区Ten Stone 组<sup>[24]</sup>; (b) 白云岩沉积于蒸发岩之上, 阿曼 Ara 群, Minassa-1 井, 3 449.8 m<sup>[31]</sup>; (c) 蒸发岩 沉积于白云岩之上, 四川盆地雷口坡组, 中46井, 3 199.3 m; (d) 白云岩夹蒸发岩, 挪威斯匹次卑尔根岛下二叠统 Gipshuken 组<sup>[61]</sup>; (e) 蒸发岩充填于白云岩裂缝 中, 四川盆地嘉陵江组, 双15井, 3 213.74 m; (f) 蒸发岩夹白云岩, 四川盆地雷口坡组, 中46井, 3 286.8 m

Fig.4 Typical lithological associations of the dolostone-evaporite paragenesis system

(2) 块状石膏:无明显内部结构,层厚在3 cm到 几米不等,岩性致密,呈浅灰色或乳白色(图5c),主要 由密集堆积的晶体组成,如突尼斯Chott el Gharsa 地 区第四纪早期<sup>[67]</sup>和鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组<sup>[58]</sup>。

(3) 鸡笼铁丝状石膏:可看作浅色石膏结核被 不规则细长的深色沉积物分隔开,如碳酸盐黏土基 质/或有机物质,呈"鸡笼铁丝"状(图5d),如伊朗波 斯 湾 侏 罗 系 Surmeh 组<sup>[49]</sup>和土耳其 Sivas 盆 地 Tuzhisar 组<sup>[54]</sup>。

(4)结核状石膏:该类石膏最为常见,如四川盆 地三叠系雷口坡组<sup>[68]</sup>、西班牙Baza盆地第四系<sup>[55]</sup>,其 通常有两种存在形式,一是以分散的球形或椭球形 结核产出于白云岩中(图5g),结核大小从几毫米到 几厘米不等;二是呈断续相连的透镜状结核产出于 薄层状白云岩中(图5e)。结核中石膏晶体通常呈不 规则粒状或细小板状(图5g)。

(5)角砾状硬石膏:角砾状结构,硬石膏与白云 岩角砾常由暗色泥岩分割开,呈灰白色,大小在0.2~ 5 cm不等,次圆状一次棱角状,宏观及微观下,角砾 岩块呈定向排列(图 5f)。值得注意的是,硬石膏与 白云岩互层后被分裂成碎屑,这可能与原岩被剥离 或其本身塑性特征有关。

(6)石盐:褐红色、浅灰色或无色、中细粒、半自 形一它形粒状晶体。褐红色石盐由小晶体组成,通 常与硬石膏结核接触(图5h),如四川盆地三叠系嘉 陵江组和雷口坡组<sup>[69]</sup>。

### 2.3 共生体系中的白云岩发育特征

共生体系中常见的白云岩类型包括晶粒白云 岩、颗粒白云岩和微生物白云岩三大类,进一步可划 分为如下五类。

### 2.3.1 晶粒白云岩

共生体系中晶粒白云岩主要为泥粉晶白云岩, 为准同生期白云石化作用的产物。其形成与干旱气 候条件下高盐度卤水的快速交代有关,因白云石结 晶速度相对较快,因此白云石晶体较小,自形程度较 差,以泥微晶白云岩为主,一般伴有少量的粉砂、泥 质和生物碎屑等。宏观岩性上泥微晶白云岩呈灰褐 色、土黄色,整体为块状,层理不发育,常含有石膏、 盐岩等蒸发岩,石膏呈结核状、柱状,常被溶蚀为蜂 窝状或局部富集状分布于白云岩中<sup>[70]</sup>。镜下泥晶或 微晶白云岩以暗色为主,可见水平薄层状构造,常与 白色膏岩互层分布,或是白云岩中夹有大量石膏斑 块、结核(图6a,b),而此类石膏常被大气淡水溶蚀形 成膏模孔,可作为一种良好的储集空间类型(图 6c)<sup>[38-59]</sup>,如四川盆地寒武系沧浪铺组、洗象池组、龙 王庙组、三叠系雷口坡组、嘉陵江组等。

### 2.3.2 颗粒白云岩

共生体系中颗粒白云岩主要为鲕粒白云岩和砂 砾屑白云岩。

①鲕粒白云岩常发育于浅滩环境中,主要由渗透 回流白云石化作用而致<sup>[13]</sup>。宏观上呈浅灰—灰褐色, 以中—薄层状或透镜状为主,微观镜下可见鲕粒由泥 微晶—粉晶白云岩组成,呈圆球状或椭球状,分选性



图 5 白云岩一蒸发岩体系中蒸发岩典型特征

(a)层状微晶石膏与泥晶白云岩呈韵律层,地中海中部 Messinian 阶,意大利<sup>[61</sup>;(b)石膏聚集体,具有聚片双晶的特征(红色箭头),塔里木盆地寒武系<sup>[6]</sup>;(c)浅 灰色块状石膏,鄂尔多斯盆地马家沟组<sup>[58]</sup>;(d)"鸡笼铁丝"状石膏,被不规则细长的碳酸盐黏土基质分隔开,SW Sivas 盆地 Tuzhisar 组,土耳其<sup>[54]</sup>);(e)白云岩中 断续相连的透镜状石膏结核,四川盆地雷口坡组,中46井,3213.6m;(b)石膏和碳酸盐组成的角砾岩,塔里木盆地寒武系,ZS5井,6194m<sup>[59]</sup>;(g)椭球状石膏结核,波斯湾盆地Salman 油田Surmeh 组,伊朗<sup>[49]</sup>;(h)褐红色石盐,四川盆地嘉陵江组,万盐104井,3072.68m

Fig.5 Typical characteristics of evaporites in the dolostone-evaporite paragenesis system

与磨圆度均较好,鲕粒含量60%~80%,粒间有白云石和石膏胶结物(图6d),如四川盆地三叠系雷口坡组。

②砂砾屑白云岩,其原岩多为砂砾屑微一粉晶灰 岩,经较强白云石化作用后形成残余砂屑白云岩,主 要发育于盐下高地貌潮下浅滩环境。砂屑分选较好, 为次圆状一次棱角状,砂屑含量40%~60%,粒度介于 0.2~1.5 mm,砂砾屑成分主要为微一粉晶白云石、泥 微晶白云石,砂屑往往与生物屑伴生,常见介形虫(图 6e),如四川盆地寒武系洗象池组、三叠系嘉陵江组。 2.3.3 微生物诱导沉淀白云岩

共生体系中还可见由微生物诱导而沉淀的白云 岩,主要包括叠层石白云岩和凝块石白云岩。该类 白云岩在扫描电镜下常呈球状、哑铃状和纺锤状等 (图 6f,g)<sup>[72]</sup>。

①叠层石白云岩呈泥一微晶结构,常见有叠层 石构造发育,暗层为藻白云石,明亮层以微晶白云石 为主,白云石含量变化范围较大75%~98%,一般在 90%左右,叠层石间充填石膏及藻屑,格架孔中亦常 有石膏充填,偶有亮晶方解石,石膏含量1%~12%不 等,泥质含量较少1%~5%。亮层内发育原生生物格 架孔,孔径大小约20~200 μm,面孔率约6%~15%,部 分孔隙被明亮方解石及硬石膏充填(图6h),如鄂尔 多斯盆地奥陶系马家沟组。

②凝块石白云岩呈深灰色一灰黑色,呈透镜状 或丘状产出,具有凝块结构,微观镜下凝块石由暗色 凝块和浅色凝块间胶结物组成,暗色凝块多呈不规 则状,个体大小不一,成分以泥一粉晶白云石为主, 凝块彼此连接成网状格架,格架间充填浅色的亮晶 胶结物(图6i),如塔里木盆地寒武系。

#### 2.4 共生体系发育的特殊性与普遍性规律

(1) 特殊性

①特殊的沉积环境。共生体系仅发育于水体相 对局限的沉积环境,如潮坪—潮上带、潟湖、局限— 蒸发台地等。

②多样的共生岩性组合。共生体系可以是同一时期的形成,也可以是不同时期的形成,可划分为5 种独特的岩性组合序列。

③共生体系下白云石粒径较小,白云石晶体大 小主要为泥晶级和微晶级,仅少数可达粉晶级。

④共生体系下白云石成因多样。既有嗜盐细菌



图 6 白云岩—蒸发岩共生体系中白云岩典型特征 (a)泥晶白云岩(黄色箭头)与膏岩(绿色箭头)水平互层,单偏光,鄂尔多斯盆地马家沟组<sup>[71]</sup>;(b)泥晶白云岩中的膏模孔(GP),单偏光,鄂尔多斯盆地马家 沟组<sup>[58]</sup>;(c)泥晶白云岩中硬石膏被溶解形成铸模孔,蓝色铸体,单偏光,塔里木盆地中下寒武统,YH10井;(d)鲕粒白云岩,单偏光,四川盆地雷口坡组,双 探102井,5127.57 m;(e)砂屑白云岩,可见石膏胶结物,四川盆地嘉陵江组,TF7井,1351.03 m;(f,g)微生物介导白云石,呈哑铃形、球形<sup>[72]</sup>;(h)叠层石白 云岩,含石膏,鄂尔多斯盆地马家沟组,米75井,2548.5 m;(h)微生物白云岩,格架孔被硬石膏充填,塔里木盆地中下寒武统<sup>[6]</sup>

Fig.6 Typical characteristics of dolostones in the dolostone-evaporite paragenesis system

的大量繁殖并诱导形成的原生白云石,也有富 Mg<sup>2+</sup> 流体作用形成的次生白云石,具体成因还有待揭示。

⑤共生体系中蒸发岩作为一种化学沉积岩,记录了古环境、古气候、古海水化学性质等信息;共生体系下微生物诱导形成的原生白云石可反应沉积期微生物的形成与演化等信息;而高 Mg<sup>2+</sup>流体作用形成的白云石可揭示成岩演化信息、成岩流体信息等。因此,共生体系对于地球地质历史演化的理解具有特殊意义。

(2) 普遍性

①共生组合普遍发育于海相和陆相咸水盆地 (或盐湖)中。

②共生体系下白云岩孔隙发育,储集性能好,与 其上覆发育的蒸发岩可构成良好的储盖组合。

③共生体系中普遍具有原生和交代作用共同形 成的白云石。

④共生体系普遍形成于海平面较低、水体局限、 气候干旱的环境,因为沉积区的蒸发量远远大于其 降水量是蒸发岩形成的必要条件。 ⑤横向上呈连片分布,纵向上白云岩与蒸发岩 交替出现。

### 2.5 共生体系的地球化学特征

有关共生体系的地球化学特征研究报道极少, 本次研究通过梳理已发表资料,结合作者认识大致 归纳为以下几点。

共生体系下白云岩通常具有如下地球化学特征:1)较高的Sr和Na含量,表明其形成于盐度较高的环境<sup>[35]</sup>;2) $\delta$ Ce和 $\delta$ Eu弱负异常或无异常,指示该类白云岩形成于弱氧化一弱还原环境,且未遭受大规模热液流体影响<sup>[19]</sup>;3) $\delta$ <sup>13</sup>C和 $\delta$ <sup>18</sup>O相比海水或海水胶结物更偏正<sup>[13,15,30]</sup>;4)较低的包裹体温度(校正温度约25 °C)<sup>[35]</sup>;5)喜氧喜盐微生物白云岩的 $\delta$ <sup>13</sup>C为-10% $\sigma$ (PDB)左右, $\delta$ <sup>18</sup>O则一直较稳定,为2% $\sigma$ -3% $\sigma$ (PDB)<sup>[73]</sup>;6)硫酸盐还原菌白云岩的 $\delta$ <sup>13</sup>C介于-5% $\sigma$ -10% $\sigma$ (PDB), $\delta$ <sup>18</sup>O为2% $\sigma$ -5% $\sigma$ (PDB)<sup>[73]</sup>。

共生体系下蒸发岩通常具有的地球化学特征包括:1)较高的δ<sup>34</sup>S值,代表封闭的咸水条件<sup>[10,74]</sup>;硬石 膏的高δ<sup>34</sup>S值代表了高温及缺氧条件<sup>[75]</sup>;2)白云岩中 大多数岩盐胶结物具有更高的溴含量(平均 $Br_{#874}$ =79×10<sup>6</sup>;平均 $Br_{@@data + 824}$ =213×10<sup>6</sup>)<sup>[76]</sup>;3)蒸发过程中 石膏更富集<sup>18</sup>0,如塔里木盆地寒武系ZS-5井的硬石 膏 $\delta$ <sup>18</sup>O值介于10.9% ~15.7% (SMOW)<sup>[73]</sup>。

要全面了解共生体系中白云岩和蒸发岩的沉积 一成岩演化特征,古环境、古气候以及古海水信息等, 就必须系统地比较不同沉积环境的共生体系地球化 学特征,特别关注周期性变化。然而,针对共生体系 下白云岩和蒸发岩的可用地球化学分析较少,目前很 难对共生体系下的地球化学特征进行系统研究,在以 后的工作中建议区分不同岩石类型或岩石组合针对 不同科学问题开展相应地球化学特征研究。

#### 2.6 共生体系中的微生物白云岩形成与沉积序列

共生体系中可以观察到微生物作用的痕迹<sup>[77]</sup>。 由于蒸发岩与白云岩共生体系形成在较干旱的气候 背景中,随着盐度升高,嗜盐古菌或硫酸盐还原菌、 产甲烷古菌开始繁盛。国内研究人员通过 *Natrinemas* sp.(极端嗜盐古菌,图6h)、*Haloferax volcanii*(沃氏富盐菌图I)作用72h后沉淀了白云石, 与Vasconcelos *et al.*<sup>[78]</sup>和Warthmann *et al.*<sup>[79]</sup>实验沉淀 的白云石具相似的球形特征,研究发现嗜盐古菌表 面的羧基官能团对白云石沉淀起到重要作用。实验 虽然证实了蒸发环境虽然有利于嗜盐古菌的繁衍, 但短时间蒸发过程不会显著影响微生物诱导原白云 石沉淀,只有盐度高到嗜盐古菌繁盛的盐度范围,才 会导致嗜盐古菌的大量繁殖并诱导形成白云石。

随着气候进一步干旱、盐度继续升高,嗜盐古菌 或其他细菌开始死亡,出现石膏结核沉淀,形成膏云 岩,当盐度增高至350‰时,开始出现石膏或石盐沉 积<sup>[7]</sup>。可见,虽然高盐度环境中衍生出的微生物对白 云石的形成具有一定的贡献,但盐度不能高于嗜盐古 菌的生存范围<sup>[8081]</sup>,盐度超过微生物生存范围后将不 利于微生物白云石化作用进行。因此,沉积序列上常 表现为微生物白云岩→膏云岩→膏盐岩的组合<sup>[7]</sup>。

### 3 共生体系的成岩作用及流体特征

### 3.1 成岩作用类型划分

目前,针对共生体系成岩作用的研究较少,尚未 见共生体系下的成岩作用类型专题研究。但沉积— 成岩环境不同,其成岩演化序列必然存在差异,除了 生物作用外,共生体系中普遍存在复杂的成岩 作用<sup>[82]</sup>。 蒸发岩经历的成岩作用主要分为三个方面: 1)同生一准同生期,受大气降水、地层水等流体的直 接作用,蒸发岩类受岩溶作用改造,形成溶蚀洞穴, 导致蒸发岩的局部缺失,如西西里<sup>[83]</sup>、美国大部分 州<sup>[84]</sup>、西班牙<sup>[85]</sup>等地。2)除岩溶作用外,蒸发岩随埋 深增加受到水动力条件和区域构造应力环境的影响 发生侧向运移或向上流动,导致局部区域蒸发岩缺 失<sup>[5]</sup>。3)蒸发岩中的硫酸盐矿物发生热化学还原作 用(TSR)促使孔渗增加,这不仅可以改变白云岩孔渗 关系<sup>[86]</sup>,还可为蒸发流体提供良好运移路径,有利于 共生体系中大规模白云岩的形成。

共生体系中白云岩经历的成岩作用主要包括: 白云石化作用、去白云石化作用、溶解作用<sup>(4)</sup>。

(1) 白云石化作用

①同生一准同生阶段,成岩作用包括胶结作用、 选择性溶蚀作用以及白云石化作用。第一、二期方 解石胶结物发生白云石化作用会发育较多的晶间 孔,经过同生一准同生期溶蚀作用,可发育一定数量 的粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔<sup>[87]</sup>;②浅埋藏一较深 埋藏的成岩阶段,沉积物遭受来自上覆地层的机械 压实,随晚期成岩阶段埋藏深度不断增大,重结晶作 用使共生体系中早期形成的泥一粉晶白云石转变为 粉一细晶白云石<sup>[88]</sup>。

(2) 去白云石化作用

共生体系中的白云石发生去白云石化作用,是 一种重要成岩作用类型<sup>[89]</sup>,流体性质被认为是影响去 白云石化作用的关键。早在20世纪初,有学者就发 现了一种与蒸发岩相关的去白云石化作用<sup>[90]</sup>。伴随 着硬石膏的溶解增加了成岩流体中 Ca<sup>2+</sup>含量,导致 Ca/Mg值增高,促进白云石被方解石交代。去白云石 化作用主要发生在晶体生长快、有序度差、存在缺陷 的白云石晶体边缘。一般认为,共生体系下的白云 石容易发生去白云石化作用,如西班牙 Ebra 盆地<sup>[91]</sup> 和 Calatayud 盆地<sup>[92]</sup>,瑞士和法国 Jura 山<sup>[93]</sup>,意大利阿 尔卑斯山南部<sup>[94]</sup>等。

(3) 溶解作用

共生体系下溶解作用常与其他成岩作用同时进行,如在近地表发生同生一准同生期海水、大气水等 溶解方解石颗粒和未完全白云石化颗粒,在白云石 基质中产生粒间溶孔,另外蒸发岩也经常被大气水 溶解,形成明显的孔隙,这为与白云石化作用有关的 高Mg/Ca流体提供了运移通道;到了中一晚埋藏阶段 受热液、有机酸等流体不仅可将硬石膏、石盐等进行 溶解形成孔隙,也可将白云石溶解形成大量的粒间 溶孔和粒内溶孔,这些过程无疑可为油气赋存提供 有利条件<sup>[19]</sup>。

### 3.2 成岩流体特征及运移路径

共生体系中蒸发岩是由日光蒸发驱动地表卤水 和近地表卤水饱和而沉淀的物质,记录了古环境、古 气候以及古海水等信息。以石盐为例,原生流体包 裹体的均一温度能反演蒸发盆地的古温度<sup>[95]</sup>,元素含 量可用于重建古海水化学成分<sup>[9697]</sup>。

共生体系下发生白云石化作用的流体来源主要 为高盐度、高Mg/Ca的盐水。蒸发条件下,蒸发岩的 形成会消耗流体中的Ca<sup>2+</sup>,使流体具有较高的Mg/Ca 值,存在灰质前驱物的情况下,这种高盐度的卤水会 交代灰质沉积物,从而形成白云石,与此同时,CaSO<sub>4</sub> 在强烈的蒸发过程中沉淀形成蒸发岩。共生体系有 利于白云石形成的条件包括:1)镁离子浓度随海水 蒸发逐渐增加;2)有机物分解消耗硫酸根离子;3)碳 酸根离子含量增加<sup>[60,98]</sup>,如在热带低纬度的威利斯顿 盆地上Katian 统地区随着蒸发岩沉淀,携带高Mg<sup>2+</sup>的 盐水渗透回流导致浅潮间带沉积层的白云石化作 用,形成共生体系<sup>[32,84]</sup>。

针对共生体系成岩流体运移路径的研究极少, 但前人常利用C、O、Sr等传统同位素与同期海水进 行对比或根据数值的不同变化进行模拟,分析成岩 流体来源、性质等<sup>[99-104]</sup>。而 Mg 同位素作为一种新兴 的非传统同位素地球化学手段,对成岩流体运移路 径的研究有着良好的效果。共生体系形成时的强蒸 发过程导致的分馏会使同时期的海水逐渐富集<sup>26</sup>Mg, 导致后期形成的白云岩 Mg同位素变重,在垂向剖面 中δ<sup>26</sup>Mg呈向上增加趋势,瑞利分馏模型可以对这一 过程进行模拟。近源白云石化流体的垂向迁移会在 垂向剖面上形成 $\delta^{26}Mg_{0zz}$ 向下增加的趋势, $\delta^{26}Mg_{0zz}$ 的绝对值受 $\delta^{26}Mg_{ikk}$ 的影响而改变,但 $\delta^{26}Mg$ 白云岩向 下变重这一趋势不会改变;在远源白云石化流体迁 移过程中,富Mg流体在静水压力梯度的作用下可能 发生横向迁移,随着迁移距离的增大, $\delta^{26}Mg_{def}$ 逐渐 变重,但在与源区距离相等的垂向剖面上,其 $\delta^{26}$ Mg 保持不变, $\delta^{26}$ Mg<sub>自运带</sub>的绝对值会白云石化流通 Mg同 位素组成、距离源区的距离、流体迁移速率等因素影 响,而 $\delta^{26}$ Mg<sub>自云岩</sub>在垂向上的趋势不会改变<sup>[105]</sup>。因此, 可以利用Mg同位素来判断白云岩—蒸发岩共生体 系中白云岩的 Mg<sup>2</sup>\*来源及白云石化流体演化路径, 这也是我们后期研究共生体系成岩流体的重点。

### 4 共生体系形成过程

### 4.1 共生体系下蒸发岩成因

如果蒸发岩完全由蒸发作用形成,则海水要蒸 发掉40%以上,盐度达19%(正常海水盐度3.5%)时 才开始沉淀<sup>[5]</sup>。蒸发岩可被细分为蒸发碱土碳酸盐 (文石、低镁方解石和高镁方解石)和蒸发岩盐(石 膏、硬石膏、石盐、天然碱、光卤石等)<sup>[5]</sup>。其中,膏盐 岩在蒸发岩中是较为常见的类型,分布规模较大<sup>[6]</sup>。 尽管前人提出了各种假说来解释蒸发岩成因,但大 规模蒸发岩成因仍不清晰。目前,"潮上萨布哈"和 "水下浓缩沉淀"两种模式用于解释浅层蒸发岩的成 因得到较多认可(图7)。无论何种成因模式,蒸发岩 矿物的形成都需要同时具备下列三项基本条件: 1)水体富含各种盐类溶质;2)干旱气候条件;3)局限 环境。蒸发岩矿物的形成需要太阳能的蒸发效应, 但不同水体在蒸发作用过程中有不同的矿物析出 序列。

以现代海水为例<sup>117]</sup>,海水蒸发浓缩至原始海水的 1.5~3倍时,HCO<sub>3</sub>和一部分的Ca<sup>2+</sup>开始被消耗,形成 碳酸盐;蒸发浓缩至5~6倍时,HCO<sub>3</sub>消耗殆尽,硫酸 钙开始析出,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和Ca<sup>2+</sup>继续被消耗,直到Ca<sup>2+</sup>消耗 殆尽(现代海水SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>摩尔含量大于Ca<sup>2+</sup>);当蒸发浓 缩至10~11倍时,石盐开始析出,Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>开始消耗, 在此阶段,卤水中主要含有Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 随着石盐不断析出,Na<sup>+</sup>含量不断减少,卤水中主含 Mg<sup>2+</sup>;当蒸发浓缩至60~70倍时,Mg盐开始析出,随 着 Mg盐的析出,卤水变得更加富K<sup>+</sup>,此时继续蒸发, 将析出钾盐镁矾和光卤石等矿物。

不仅是海水可以形成大规模的蒸发岩,陆相盐 湖也可形成大规模的蒸发岩,如大多数第四纪以来 的石盐卤水皆来自于陆相盐湖<sup>[106]</sup>,这种非海相蒸发 岩也引起了学界重视,如对中国内陆青海湖的研究 揭示了完全不同于海水的析盐序列和矿物组合<sup>[107]</sup>。 这些各具特色的海相/非海相蒸发岩研究,丰富了蒸 发岩研究体系。

#### 4.2 共生体系下白云岩成因

自1791年,法国学者 Deodal de Dolomieu 首次描述白云石后,白云石成因一直是学界关注和研究的 热点,目前已有众多白云石化模式被提出,如萨布哈 模式<sup>[109]</sup>、渗透回流模式<sup>[109]</sup>、混合水模式<sup>[110]</sup>、埋藏模 式<sup>[111]</sup>、热对流模式<sup>[112]</sup>和微生物模式<sup>[113]</sup>等(图8)。

而共生体系中的白云岩成因类型主要与萨布哈、 渗流回流以及微生物白云石化作用有关。一方面,蒸 发会增加海水盐度,促使嗜盐微生物大量繁衍并诱导 白云石沉淀,同时沉淀蒸发岩,导致潮上带粒间水的 Mg/Ca值增加<sup>60</sup>,这有利于文石或方解石发生白云石 化。白云石化作用降低了沉积物中孔隙流体的 Mg/Ca值,增加了Ca<sup>2+</sup>浓度,进而又会促进了蒸发岩的 形成<sup>16]</sup>。因此只要有周期性的海水输入,萨布哈受限 盐水环境中就会持续发生白云石化作用并形成白云 岩<sup>16]</sup>。另一方面,Mg<sup>2+</sup>的浓度随着盐度的增加而增大, 在重力或浓度梯度的驱动下高Mg/Ca流体发生渗透 回流,使下伏的碳酸盐岩前驱物发生白云石化。



图7 海相台地蒸发岩、盆地蒸发岩成因示意图(据文献[4]修改)

Fig.7 Schematic diagram of the genesis of marine platform evaporite and basinwide evaporite (modified from reference[4])



Fig.8 Schematic diagram of typical dolomitization model and its hydrological process (modified from references[113-114])

### 4.3 共生体系形成模式

根据古地理背景,白云岩和蒸发岩的形成环境 主要有两种类型:1)碳酸盐台地边缘的大型半局限 盆地;2)面向公海的碳酸盐岩边缘或屏障后面的蒸 发盆地和潟湖<sup>[115]</sup>。

受到全球海平面波动或者区域构造抬升的影 响,限制了局部地区与大洋水体间的交换。在海侵 阶段,随着海平面上升,通常以沉积灰岩为主,但随 着海平面下降至无法与大洋进行水体交换,气候干 旱,盐分不断积累,半封闭咸水环境下含盐量增加至 盐类矿物析出,从而形成蒸发岩;蒸发岩的沉淀会消 耗水体中的钙离子,使卤水中富含镁离子,这种高盐 度的卤水会向下运移交代灰岩沉积物,从而形成白 云岩,这类可促进白云石化的海水被认为具有高温、 高盐度、高Mg/Ca值的特性<sup>[116]</sup>。高盐度环境也适宜嗜 盐类微生物的繁衍,对共生体系中白云岩的形成也 具有贡献<sup>[80-81]</sup>。但随着气候变的极度干旱,含盐量急 剧增加,嗜盐类细菌消亡,大量蒸发岩形成,白云岩 减少,逐渐过渡为盐岩(图9)。因此,共生体系的形成源于较高盐度下白云岩的形成和蒸发岩的沉淀, 并受到生物地球化学过程影响和多期成岩作用叠加改造<sup>[80]</sup>。

# 5 白云岩一蒸发岩共生体系与储层 形成关系

白云岩与蒸发岩共生体系在世界范围内自震旦 系到古近系具有广泛分布,其蕴藏着丰富的油气资 源<sup>[59,117-118]</sup>。尽管蒸发岩占世界沉积岩的比例不到 2%,但世界上最大的油田中有一半是由蒸发岩封闭 的<sup>[5]</sup>。因此,共生体系中蒸发岩封闭性良好,控油气 能力强,具有成为良好盖层的潜力<sup>[119-121]</sup>。白云岩—蒸 发岩共生体系中以蒸发岩作为盖层的典型盆地主要 有沙特Ghawar油气田<sup>[122]</sup>、卡塔尔—伊朗North-Pars 气 田<sup>[7]</sup>、塔里木盆地<sup>[121,123]</sup>、鄂尔多斯盆地<sup>[124]</sup>、四川盆地<sup>[125]</sup> 等。在共生体系中蒸发岩除了能作为良好的盖层



外,其对储层形成等方面有着至关重要的影响,主要 体现在以下几个方面。

### (1) 白云石化作用

共生体系发育的蒸发环境有利于白云石化作用进行,使得方解石被白云石替代,导致其体积缩小约14.8%,从而提升原生孔隙度<sup>[126]</sup>,此外白云岩具有良好抗压实性和脆性,往往能形成较好的储层。

(2) BSR作用

共生体系中微生物对储层也有一定影响,蒸发 岩与下伏泥岩或灰岩接触位置,有利于微生物硫酸 盐作用(BSR)生成白云岩,同时硬石膏中的S<sup>6+</sup>还原为 S<sup>2-</sup>生成H<sub>2</sub>S<sup>[127]</sup>,硫化氢气体溶于水形成酸性流体会对 储层进行溶蚀,形成溶蚀孔洞。另外,微生物形成的 "格架孔"本身也是良好的储集空间<sup>[128]</sup>。

(3) 孔隙的形成与保存作用

蒸发岩具有密度稳定、热导电率的特性<sup>[129]</sup>,因而 使得其下部的白云岩层中的热量较低,减缓了成岩 作用的进程,并且蒸发岩层对压实作用有一定的抑 制作用<sup>[130]</sup>,因此共生体系中蒸发岩的存在有利于下 部白云岩的孔隙保存。

(4) 共生体系中蒸发岩溶解作用

共生体系中蒸发岩常呈结核状或薄层状与白云 岩共生,其本身属于易溶组分,极易受到大气淡水或 地下水的淋滤而发生溶蚀,常形成膏模孔、膏溶角砾 砾间孔<sup>[126]</sup>,另外在埋藏期即使没有流体的介入,石膏 向硬石膏转化的过程,会释放结晶水,其与有机酸结 合形成酸性流体,增强水/岩反应,促进了次生溶孔的 发育<sup>[131]</sup>。

(5) TSR作用

共生体系中蒸发岩的存在还会促进硫酸盐还原 作用(TSR)<sup>[59,132]</sup>,海相碳酸盐岩优质储层的形成与硫 酸盐的还原作用密不可分,而蒸发岩则为硫酸盐还 原反应的顺利进行提供了物质基础。如我国塔里木 盆地寒武系<sup>[121]</sup>、鄂尔多斯盆地马家沟组<sup>[124]</sup>、四川盆地 雷口坡组<sup>[133]</sup>等常在深埋藏条件下,上覆地层高成熟 的烃类向下运移至共生体系中与膏盐岩组分常发生 硫酸盐还原作用,而产生H<sub>2</sub>S进而形成具有腐蚀性的 氢硫酸,会对早期形成的孔隙进一步溶蚀扩大,对于 储层物性的提升有着关键性的作用,此外,伴随着硫 酸盐还原作用的进行,膏盐因提供SO<sub>4</sub><sup>-</sup>供应,而发生 溶解,也会形成一系列孔隙,进一步改善了储层 物性。

### 6 共生体系的主控因素

通过调研认为,共生体系的主控因素可能与海 平面变化、古气候转变和古环境变迁密切相关<sup>[134135]</sup>。

### 6.1 海平面变化

海平面较低时,水体循环较差,海水得不到及时补充,蒸发作用下,盐度势必升高,嗜盐类微生物大量繁衍及高 Mg/Ca流体的渗透回流都可形成白云石;随着蒸发的继续进行,盐度持续升高,逐渐开始形成蒸发岩<sup>[136]</sup>。在海平面波动下,转入海侵阶段时,海水盐度降低至白云石形成时的盐度,将重启白云石化作用。因此,周期性的海水输入,在受限盐水环境中将依次形成白云石和蒸发岩。但海侵规模较大,水体循环流畅时,则主要发育泥晶灰岩和颗粒灰岩,仅夹少量白云岩。

相似的研究实例如阿曼南部新元古代末期一早 寒武世Ara群,被划分为六个白云岩一蒸发岩层序, 在低位体系域时主要发育蒸发岩,其上部的海侵体 系域及高位体系域以白云岩为主含少量蒸发岩[21];塔 里木盆地下寒武统至中寒武统白云岩与蒸发岩垂向 发育特征也是由于海侵和海退频繁交替导致白云岩 与蒸发岩在垂向上交替分布<sup>[6]</sup>;鄂尔多斯盆地下奥陶 统马家沟组马五段自下而上岩性依次为藻纹层白云 岩、藻砂屑白云岩、含膏纹层白云岩、膏云岩和膏盐 岩,也明显受控于海平面变化<sup>[137]</sup>。因此,海平面的循 环变化是共生体系形成的关键。

### 6.2 古气候

前人研究认为白云岩是干旱环境下的产物,蒸 发岩代表的是一种极度干旱的环境,而微生物白云 岩则代表着相对潮湿一半干旱的过渡环境<sup>[7,138]</sup>。因 此,气候的变迁决定了共生体系的岩性组合序列,如 美国Williston盆地Red River组岩性自下而上为微生 物白云岩、膏云岩和膏岩<sup>[32]</sup>,该类岩性垂向变化明显 受控于气候影响,反映沉积期气候由相对潮湿向干 旱环境的变迁。而在四川盆地中三叠统雷口坡组和 埃及Maghra El-Bahari组正好出现与前者相反的现 象,即气候由干旱向相对潮湿的转变,岩性由下至上 依次为膏岩、膏云岩和微生物白云岩<sup>[7]</sup>。但并非所有 共生体系的岩性序列如上述这般完整,气候的突变 也会导致某种岩性的缺失,如微生物白云岩被膏云 岩所取代,在美国Oklahoma Blaine 组<sup>[139]</sup>、四川盆地嘉 陵江组<sup>[140]</sup>和伊朗Sachun 组<sup>[141]</sup>等常见此类微生物白云 岩不发育的现象,这可能是气候突然极度干旱,盐度 突变超出嗜盐微生物的适宜范围所致,盐度进一步 升高到140%。以上时才直接沉淀了膏盐岩<sup>[7]</sup>。因此, 古气候是共生体系形成的不可或缺的因素。

### 6.3 沉积环境

共生体系下白云岩与蒸发岩密切相关,其可由 沉积形成,如微生物介导形成原生白云石与沉积析 出的盐类矿物互层产出;也可由成岩作用形成,如强 蒸发环境形成高Mg/Ca流体交代方解石形成白云石, 在地层中表现为横向上呈连片分布,纵向上白云岩 与蒸发岩呈交替状分布<sup>[142-145]</sup>。

共生体系的发育首先需要水体相对局限,因此 沉积环境是共生体系发育的基础。其主要发育于潮 坪的潮上带、局限潟湖及蒸发盆地三类水体较为局 限的沉积环境,前者有利于潮上萨布哈白云石化作 用,后两者有利于渗透回流白云石化作用。潮上萨 布哈位于平均高潮线之上,受海水作用较小,呈半干 旱一干旱状态。海洋水体和大陆水的蒸发作用可使 萨布哈环境下孔隙流体达到蒸发岩矿物饱和度,从 而发生沉淀。这种沉淀会引起孔隙流体的Mg/Ca急 剧增高,有利于白云石的形成<sup>[106]</sup>。因此,萨布哈环境 下常形成共生体系,近年的国内外研究中也证实了 这一点,如美国威林斯顿盆地奥陶系 Red River组、伊 朗 Zagros Basin Dalan 组和中国松辽盆地馒头 组等<sup>[29,42,146]</sup>。

相比之下,局限潟湖和蒸发台地的水体相对较 深,盐度较高且稳定。由于海平面下降,并受古隆起 或礁滩体的隔挡,局限潟湖和蒸发台地与外海间的 水体交换受限,沉积物沉淀受盐度梯度控制,高盐度 水体流入洼地形成厚层蒸发岩矿物,从而促使富镁 离子的卤水向下回流渗透发生白云石化作用,如澳 大利亚 Carnarvon Basin Coburn 组<sup>[36]</sup>、四川盆地寒武 系、三叠系嘉陵江组<sup>[147]</sup>和塔里木盆地寒武系<sup>[27]</sup>等蒸发 岩在沉积中心呈环状分布,外围可见白云岩,未见暴 露痕迹,已有研究认为其主要沉积于局限台地潟湖 或蒸发台地<sup>[148-150]</sup>。因此,沉积环境是共生体系形成 的基础。

### 7 共生体系主要研究方法

关于白云岩与蒸发岩共生体系的研究还处于起步阶段,目前针对共生体系的研究方法主要包括:实验模拟研究、沉积结构特征研究、微体古生物研究和

地球化学研究等方法。具体如下:

(1) 实验模拟研究

通过海水蒸发实验可重建古海水和卤水成 分<sup>[151-153]</sup>,这一研究方法需要结合理论计算、实验模拟 和现场勘察<sup>[154-155]</sup>。目前盛行的实验模拟研究包括: 在海水蒸发实验模拟中评估古今海水成分的差 异<sup>[156]</sup>,以及在海水蒸发实验中评估同位素地球化学 分馏程度<sup>[157]</sup>等。

(2) 沉积结构特征研究

关于共生体系沉积结构的研究,常规运用蒸发 盐与白云岩的宏观结构进行沉积微相的划分<sup>[5]</sup>。但 由于古代蒸发岩极易溶解,导致古代蒸发岩大都以 溶蚀角砾出露,使得前人研究多基于岩心、测井、地 震等地下资料进行分析<sup>[5,158]</sup>。目前相关研究主要通 过寻找发育完好的野外剖面露头,以更直观的研究 共生体系沉积特征<sup>[61]</sup>。此外,在对共生体系的研究中 应关注更微观的沉积结构变化,如开展显微藻纹层 结构、球粒结构、凝块结构等的划分和总结<sup>[159]</sup>,以及 对似球粒状结构的纳米级显微观察分析<sup>[160]</sup>等。

(3) 微体古生物研究

共生体系中沉积的蒸发岩矿物结晶速度较快, 可快速埋藏细胞并完整保存化石<sup>[161]</sup>;共生体系中的 泥微晶白云石也能够完好的保存微体化石<sup>[162]</sup>,因此 非常有利于微体化石的识别。通过微体古生物的识 别,可更加准确的恢复共生体系形成环境,如藻类或 蓝细菌可判断沉积水体较浅且位于透光带内<sup>[163-164]</sup>; 通过统计赋存的蓝细菌、广盐硅藻、狭盐硅藻、絮状 "海雪"等有机体残留物数量,可判断沉积期水柱生 产力<sup>[162]</sup>;借助硅藻对环境变化的敏感反应,可解释沉 积期海底的物理化学条件以及硅藻对海洋生态系统 和硅循环的潜在影响<sup>[165]</sup>。

(4) 地球化学研究

通过同位素、元素等在地质历史中所发生的变 化进行共生体系中的白云岩研究,如通过Sr同位素 分析技术分析白云石化流体运移路径,探讨白云石 化流体与海水间的关系<sup>[166]</sup>;运用常量、微量元素和 稳定同位素等地化手段判断白云岩沉积和成岩环 境<sup>[104]</sup>;通过白云石化成岩环境的分析来判断优质储 层发育条件<sup>[167-168]</sup>;恢复白云岩形成时古温度区间, 推断白云岩成岩环境<sup>[167]</sup>等。这些手段虽然对于白 云岩形成机制方面具有卓越的进展,但是需要综合 多种地球化学分析结果,且由于地化分析的多解性 因素,在判断白云石化过程及 Mg 离子的来源时不 能提供唯一的约束。近年来随着技术革新,研究手 段已经不仅仅局限于野外考察和室内常规的地球 化学测试分析,更加先进的技术也应用到白云岩研 究中,例如 LA-ICP-MS、纳米离子探针、原位同位素、 场发射电子探针等,加之利用计算机进行数值模 拟,建立新的白云石化过程模型,Ca同位素、S同位 素、团簇同位素、Mg同位素都可以为共生体系研究 提供强大的推动力。共生体系中蒸发岩是恢复古 气候记录的较好替代指标,亦可通过上述手段对共 生体系中蒸发岩进行研究,恢复共生体系形成时的 古气候变化,这对于地质历史演化具有极重要的科 学意义。

8 研究意义及展望

### 8.1 研究意义

(1)从前寒武纪至全新世,白云岩常与蒸发岩密 切共生,且遍及全球,然而其共生发育特征、形成过 程、主控因素和发育机制目前尚不清楚。若能厘清 二者间的共生关系、形成过程及影响因素,可以深化 关于"白云石问题"的认识。

(2) 共生体系既承载了沉积时期的古环境、古气候以及古海水化学等信息,也记录了成岩期流体演化过程,这可以促进对地球地质历史演化的理解。因此,系统开展共生体系沉积、成岩的研究,能提供更多有关地球地质历史演化方面的认识。

(3) 在全球地质历史演化中,共生体系普遍存在 于所有类型的含油气盆地,油气勘探工作者对共生 体系重视程度逐渐提高,若能厘清共生体系的成因 机制,可能对油气勘探具有重要指导意义。

(4) 共生体系的发育是蒸发岩与白云岩从沉积 到成岩系统过程高度关联的结果,是良好的古环境 恢复替代指标及成岩指示工具。

(5) 共生体系在地质历史时期广泛发育,将其与 碳酸盐岩研究相结合,将进一步丰富和完善沉积学 理论。

### 8.2 存在问题及下步展望

尽管前期积累了一定的研究成果,但共生体系 在形成过程中受复杂的沉积—成岩作用影响,其时 空分布、沉积特征、矿物组合、地球化学特征、微生物 作用、流体来源、流体运移路径、流体驱动力、古气候 记录等系列科学问题有待深入研究。 随着科技进步带来的实验手段革新,建议在白 云岩一蒸发岩共生体系研究中加强如下六方面 研究:

(1)共生体系形成环境与成因的指标(如Mg同位素数值模拟、微生物遗迹等)建立,并利用高分辨率沉积学和微观地层学揭示共生体系沉积动力学机制和控制因素。

(2) 共生体系中矿物组合、形态特征及相对含量 与古气候、古环境的耦合性。

(3) 微生物与非生物因素对共生体系中白云石 形成的影响以及识别标志。

(4) 共生体系的矿物学与地球化学特征在沉积一成岩作用过程中的变化及其影响机制。

(5) 共生体系的古气候研究。

(6) 随盐度增加,高 Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup>流体会导致前驱物 发生白云石化作用,形成白云岩,随盐度继续升高, 白云岩减少,开始沉积蒸发岩,但随着蒸发岩的沉淀 移除了大量的 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup>极大提高,理论上可以继 续发生白云石化作用<sup>[27,169-172]</sup>,但转变过程中的白云石 化机制及物质循环有待深入研究。

### 参考文献(References)

- Riechelmann S, Mavromatis V, Buhl D, et al. Controls on Formation and alteration of early diagenetic dolomite: A multi-proxy δ<sup>44/40</sup>Ca, δ<sup>26</sup>Mg, δ<sup>18</sup>O and δ<sup>13</sup>C approach[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 283: 167-183.
- Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52 (1-3): 1-81.
- [3] Land L S. Failure to precipitate dolomite at 25 °C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years[J]. Aquatic Geochemistry, 1998, 4(3/4): 361-368.
- [4] Warren J K. Evaporites: Sediments, resources and hydrocarbons[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [5] Warren J K. Evaporites: A geological compendium [M]. 2nd ed. Cham: Springer, 2016.
- [6] Chen X, Wei M Y, Li X B, et al. The co-relationship of marine carbonates and evaporites: A study from the Tarim Basin, NW China[J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35(4): 122.
- [7] 胡安平,沈安江,杨翰轩,等. 碳酸盐岩一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,2019,46(5):916-928. [Hu Anping, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, et al. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 916-928. ]
- [8] Mazumdar A, Strauss H. Sulfur and strontium isotopic composi-

tions of carbonate and evaporite rocks from the Late Neoproterozoic-Early Cambrian Bilara Group (Nagaur-Ganganagar Basin, India): Constraints on intrabasinal correlation and global sulfur cycle[J]. Precambrian Research, 2006, 149(3/4): 217-230.

- [9] Allen P A. The Huqf Supergroup of Oman: Basin development and context for Neoproterozoic glaciation [J]. Earth-Science Reviews, 2007, 84(3/4): 139-185.
- [10] Prince J K G, Rainbird R H, Wing B A. Evaporite deposition in the mid-Neoproterozoic as a driver for changes in seawater chemistry and the biogeochemical cycle of sulfur[J]. Geology, 2019, 47(4): 375-379.
- [11] 史卜庆,王兆明,万仑坤,等. 2020年全球油气勘探形势及
  2021年展望[J]. 国际石油经济,2021,29(3):39-44. [Shi Buqing, Wang Zhaoming, Wan Lunkun, et al. The global oil and gas exploration situation in 2020 and the outlook for 2021[J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(3): 39-44. ]
- [12] 孙旭东,郑求根,郭兴伟,等.巴西桑托斯盆地构造演化与油 气勘探前景[J].海洋地质前沿,2021,37(2):37-45.[Sun Xudong, Zheng Qiugen, Guo Xingwei, et al. Tectonic evolution of Santos Basin, Brazil and its bearing on oil-gas exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(2): 37-45.]
- [13] 任影,钟大康,高崇龙,等.川东寒武系龙王庙组白云岩地球 化学特征、成因及油气意义[J].石油学报,2016,37(9):1102-1115. [Ren Ying, Zhong Dakang, Gao Chonglong, et al. Geochemical characteristics, genesis and hydrocarbon significance of dolomite in the Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1102-1115.]
- [14] 包洪平,杨帆,蔡郑红,等.鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩成因及白云岩储层发育特征[J]. 天然气工业,2017,37(1):32-45.
  [Bao Hongping, Yang Fan, Cai Zhenghong, et al. Origin and reservoir characteristics of Ordovician dolostones in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 32-45.]
- [15] 郑剑锋,沈安江,刘永福,等. 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,2013,31(1);
  89-98. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Main controlling factors and characteristics of Cambrian dolomite reservoirs related to evaporite in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1); 89-98. ]
- [16] 于洲,丁振纯,王利花,等.鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五 段膏盐下白云岩储层形成的主控因素[J].石油与天然气地 质,2018,39(6):1213-1224. [Yu Zhou, Ding Zhenchun, Wang Lihua, et al. Main factors controlling formation of dolomite reservoir underlying gypsum-salt layer in the 5<sup>th</sup> member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1213-1224. ]
- [17] Warren J K. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits [J]. Earth-Science Reviews, 2010, 98(3/4): 217-268.
- [18] 杜金虎,汪泽成,邹才能,等. 上扬子克拉通内裂陷的发现及

对安岳特大型气田形成的控制作用[J]. 石油学报,2016,37 (1):1-16. [Du Jinhu, Wang Zecheng, Zou Caineng, et al. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its coutrol effect on the formation of Anyue giant gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 1-16. ]

- [19] 付斯一,张成弓,陈洪德,等.鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马 家沟组五段盐下白云岩储集层特征及其形成演化[J]. 石油勘 探 与开发, 2019, 46 (6) 1087-1098. [Fu Siyi, Zhang Chenggong, Chen Hongde, et al. Characteristics, formation and evolution of pre-salt dolomite reservoirs in the fifth member of the Ordovician Majiagou Formation, mid-east Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46 (6): 1087-1098.]
- [20] 王立成,刘成林,张华. 华南地块震旦纪晚期—早寒武世古大陆位置暨灯影组蒸发岩成钾条件分析[J]. 地球学报,2013,34
  (5):585-593. [Wang Licheng, Liu Chenglin, Zhang Hua. Tectonic and sedimentary settings of evaporites in the Dengying Formation, South China Block: Implications for the potential of potash formation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(5): 585-593.]
- [21] Schröder S, Schreiber B C, Amthor J E, et al. A depositional model for the terminal Neoproterozoic-Early Cambrian Ara Group evaporites in south Oman[J]. Sedimentology, 2003, 50 (5): 879-898.
- [22] Prasad B, Asher R, Borgohai B. Late Neoproterozoic (Ediacaran)-Early Paleozoic (Cambrian) acritarchs from the marwar supergroup, Bikaner-Nagaur Basin, Rajasthan [J]. Journal of the Geological Society of India, 2010, 75(2): 415-431.
- [23] Schmid S. Neoproterozoic evaporites and their role in carbon isotope chemostratigraphy (Amadeus Basin, Australia)[J]. Precambrian Research, 2017, 290: 16-31.
- [24] Turner E C, Bekker A. Thick sulfate evaporite accumulations marking a Mid-Neoproterozoic oxygenation event (Ten Stone Formation, Northwest Territories, Canada)[J]. Geological Society of America Bulletin, 2016, 128(1/2): 203-222.
- [25] 杜金虎,潘文庆. 塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发,2016,43(3):327-339.
  [Du Jinhu, Pan Wenqing. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 327-339. ]
- [26] 顾志翔,何幼斌,彭勇民,等.四川盆地下寒武统膏盐岩"多 潟湖"沉积模式[J]. 沉积学报,2019,37(4):834-846. [Gu Zhixiang, He Youbin, Peng Yongmin, et al. "Multiple-lagoon" sedimentary model of the Lower Cambrian gypsum-salt rocks in the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37 (4):834-846.]
- [27] 刘丽红,高永进,王丹丹,等. 塔里木盆地寒武系膏盐岩对盐 下白云岩储层的影响[J]. 岩石矿物学杂志,2021,40(1):109-120. [Liu Lihong, Gao Yongjin, Wang Dandan, et al. The im-

pact of gypsum salt rock on Cambrian subsalt dolomite reservoir in Tarim Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 40 (1): 109-120. ]

- [28] 景帅. 塔里木盆地巴楚隆起带寒武系白云岩岩相与地球化学 特征[D]. 西安:西安石油大学,2020. [Jing Shuai. Lithic facies and geochemical characteristics of Cambrian dolomite in the Bachu uplift belt, Tarim Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020. ]
- [29] 吴贇. 辽宁省石膏矿地质特征、成因及成矿预测[D]. 长春: 吉林大学,2019. [Wu Yun. Geological characteristics, genesis and metallogenic prediction of the gypsum deposits in Liaoning province[D]. Changchun: Jilin University, 2019. ]
- [30] 邹佐元,向芳,沈昕,等. 沉积相带控制下的白云岩成因模式 及判别特征[J]. 科学技术与工程,2020,20(15):5887-5899.
  [Zou Zuoyuan, Xiang Fang, Shen Xin, et al. Genesis and identification of dolomite under the control of sedimentary facies zone[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(15): 5887-5899.]
- [31] Grotzinger J, Al-Rawahi Z. Depositional facies and platform architecture of microbialite-dominated carbonate reservoirs, Ediacaran-Cambrian Ara Group, Sultanate of Om [J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(8): 1453-1494.
- [32] Husinec A. Sequence stratigraphy of the Red River Formation, Williston Basin, USA: Stratigraphic signature of the Ordovician Katian greenhouse to icehouse transition[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77: 487-506.
- [33] Black T J. Evaporite karst of northern Lower Michigan[J]. Carbonates and Evaporites, 1997, 12(1): 81-83.
- [34] Coniglio M, Frizzell R O B, Pratt B R. Reef-capping laminites in the Upper Silurian carbonate- to-evaporite transition, Michigan Basin, south-western Ontario[J]. Sedimentology, 2004, 51 (3): 653-668.
- [35] 苏中堂,陈洪德,徐粉燕,等.鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩 地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. 岩石学报,2011,27
  (8):2230-2238. [Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, et al. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2230-2238.]
- [36] El-Tabakh M, Mory A, Schreiber B C, et al. Anhydrite cements after dolomitization of shallow marine Silurian carbonates of the Gascoyne Platform, southern Carnarvon Basin, western Australia[J]. Sedimentary Geology, 2004, 164(1/2): 75-87.
- [37] Machel H G, Buschkuehle B E. Diagenesis of the Devonian Southesk-cairn carbonate complex, Alberta, Canada: Marine cementation, burial dolomitization, thermochemical sulfate reduction, anhydritization, and squeegee fluid flow [J]. Journal of Sedimentary Research, 2008, 78(5): 366-389.
- [38] Nagy Z R, Somerville I D, Gregg J M, et al. Lower Carboniferous peritidal carbonates and associated evaporites adjacent to the Leinster Massif, southeast Irish Midlands [J]. Geological

Journal, 2005, 40(2): 173-192.

- [39] 郭凯,程晓东,范乐元,等. 滨里海盆地东缘北特鲁瓦地区白 云岩特征及其储层发育机制[J]. 沉积学报,2016,34(4):747-757. [Guo Kai, Cheng Xiaodong, Fan Leyuan, et al. Characteristics and development mechanism of dolomite reservoirs in North Truva of eastern Pre-Caspian Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(4): 747-757. ]
- [40] 郑荣才,党录瑞,郑超,等. 川东一渝北黄龙组碳酸盐岩储层的成岩系统[J]. 石油学报,2010,31(2):237-245. [Zheng Rongcai, Dang Lurui, Zheng Chao, et al. Diagenetic system of carbonate reservoir in Huanglong Formation from East Sichuan to North Chongqing area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (2):237-245.]
- [41] Becker F, Bechstädt T. Sequence stratigraphy of a carbonateevaporite succession (Zechstein 1, Hessian Basin, Germany)
   [J]. Sedimentology, 2006, 53(5): 1083-1120.
- [42] Amel H, Jafarian A, Husinec A, et al. Microfacies, depositional environment and diagenetic evolution controls on the reservoir quality of the Permian Upper Dalan Formation, Kish gas field, Zagros Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 67: 57-71.
- [43] 张杰,何周,徐怀宝,等.乌尔禾—风城地区二叠系白云质岩 类岩石学特征及成因分析[J]. 沉积学报,2012,30(5):859-867. [Zhang Jie, He Zhou, Xu Huaibao, et al. Petrological characteristics and origin of Permian Fengcheng Formation dolomitic rocks in Wuerhe-Fengcheng area, Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 859-867.]
- [44] Raines MA, Dewers TA. Dedolomitization as a driving mechanism for karst generation in Permian Blaine Formation, southwestern Oklahoma, USA [J]. Carbonates and Evaporites, 1997, 12(1): 24-31.
- [45] Calça C P, Fairchild T R, Cavalazzi B, et al. Dolomitized cells within chert of the Permian Assistência Formation, Paraná Basin, Brazil[J]. Sedimentary Geology, 2016, 335: 120-135.
- [46] Li P P, Zou H Y, Yu X Y, et al. Source of dolomitizing fluids and dolomitization model of the Upper Permian Changxing and Lower Triassic Feixianguan formations, NE Sichuan Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 125: 104834.
- [47] Sun C Y, Hu M Y, Hu Z G, et al. Sedimentary facies and sequence stratigraphy in the Lower Triassic Jialingjiang Formation, Sichuan Basin, China [J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2019, 9(2): 837-847.
- [48] 金之钧,龙胜祥,周雁,等.中国南方膏盐岩分布特征[J].石油与天然气地质,2006,27(5):571-583,593.[Jin Zhijun,Long Shengxiang, Zhou Yan, et al. A study on the distribution of saline-deposit in southern China[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 571-583, 593.]
- [49] Beigi M, Jafarian A, Javanbakht M, et al. Facies analysis, diagenesis and sequence stratigraphy of the carbonate-evaporite suc-

cession of the Upper Jurassic Surmeh Formation: Impacts on reservoir quality (Salman oil field, Persian Gulf, Iran) [J]. Journal of African Earth Sciences, 2017, 129: 179-194.

- [50] Konari M B, Rastad E. Nature and origin of dolomitization associated with sulphide mineralization: New insights from the Tappehsorkh Zn-Pb (-Ag-Ba) deposit, Irankuh mining district, Iran[J]. Geological Journal, 2018, 53(1): 1-21.
- [51] Wanas H A. Petrography, geochemistry and primary origin of spheroidal dolomite from the Upper Cretaceous/Lower Tertiary Maghra El-Bahari Formation at Gabal Ataqa, Northwest Gulf of Suez, Egypt [J]. Sedimentary Geology, 2002, 151 (3/4) : 211-224.
- [52] Lüning S, Gräfe K U, Bosence D, et al. Discovery of marine Late Cretaceous carbonates and evaporites in the Kufra Basin (Libya) redefines the southern limit of the Late Cretaceous transgression [J]. Cretaceous Research, 2000, 21 (6) : 721-731.
- [53] Quijada I E, Benito M I, Suarez-Gonzalez P, et al. Challenges to carbonate-evaporite peritidal facies models and cycles: Insights from Lower Cretaceous stromatolite-bearing deposits (Oncala Group, N Spain) [J]. Sedimentary Geology, 2020, 408: 105752.
- [54] Gündogan I, Önal M, Depçi T. Sedimentology, petrography and diagenesis of Eocene-Oligocene evaporites: The Tuzhisar Formation, SW Sivas Basin, Turkey[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 25(5): 791-803.
- [55] Gibert L, Ortí F, Rosell L. Plio-Pleistocene lacustrine evaporites of the Baza Basin (Betic Chain, SE Spain)[J]. Sedimentary Geology, 2007, 200(1/2): 89-116.
- [56] 王晓晓,韩作振,李明慧,等.柴达木盆地西部SG-1钻孔中白云石成因探讨[J]. 高校地质学报,2020,26(5):520-529.
  [Wang Xiaoxiao, Han Zuozhen, Li Minghui, et al. On the origin of dolomite in laustrine sediments of the borehole SG-1 in western Qaidam Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2020, 26(5): 520-529.]
- [57] Strohmenger C J, Al-Mansoori A, Al-Jeelani O, et al. The sabkha sequence at Mussafah Channel (Abu Dhabi, United Arab Emirates) : Facies stacking patterns, microbial-mediated dolomite and evaporite overprint [J]. GeoArabia, 2010, 15 (1) : 49-90.
- [58] Liu M J, Xiong Y, Xiong C, et al. Evolution of diagenetic system and its controls on the reservoir quality of pre-salt dolostone: The case of the Lower Ordovician Majiagou Formation in the central Ordos Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 122: 104674.
- [59] Jiang L, Hu S Y, Zhao W Z, et al. Diagenesis and its impact on a microbially derived carbonate reservoir from the Middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(12): 2599-2628.
- [60] de Lange G J, Krijgsman W. Messinian salinity crisis: A novel

unifying shallow gypsum/deep dolomite Formation mechanism [J]. Marine Geology, 2010, 275(1/2/3/4): 273-277.

- [61] Sorento T, Olaussen S, Stemmerik L. Controls on deposition of shallow marine carbonates and evaporites-Lower Permian Gipshuken Formation, central Spitsbergen, Arctic Norway[J]. Sedimentology, 2020, 67(1): 207-238.
- [62] 张静,张宝民,单秀琴.中国中西部盆地海相白云岩主要形成 机制与模式[J].地质通报,2017,36(4):664-675.[Zhang Jing, Zhang Baomin, Shan Xiuqin. Major formation mechanisms and models of marine dolomite in middle and western basins of China[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4): 664-675.]
- [63] Sánchez-Román M, McKenzie J A, de Luca Rebello Wagener A, et al. Presence of sulfate does not inhibit low-temperature dolomite precipitation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 285(1/2): 131-139.
- [64] 王小林,胡文瑄,张军涛,等. 塔里木盆地和田1井中寒武统膏 岩层段发现原生白云石[J]. 地质论评,2016,62(2):419-433.
  [Wang Xiaolin, Hu Wenxuan, Zhang Juntao, et al. Discovery of primary dolomite in evaporite sequences of Hetian-1 well, Middle Cambrian, Tarim Basin[J]. Geological Review, 2016, 62(2): 419-433. ]
- [65] Borrelli M, Perri E, Critelli S, et al. The onset of the Messinian Salinity Crisis in the central Mediterranean recorded by presalt carbonate/evaporite deposition [J]. Sedimentology, 2021, 68(3): 1159-1197.
- [66] Schinteie R, Brocks J J. Paleoecology of Neoproterozoic hypersaline environments: Biomarker evidence for haloarchaea, methanogens, and cyanobacteria [J]. Geobiology. 2017, 15 (5): 641-663.
- [67] Barbieri R, Stivaletta N, Marinangeli L, et al. Microbial signatures in sabkha evaporite deposits of Chott el Gharsa (Tunisia) and their astrobiological implications [J]. Planetary and Space Science, 2006, 54(8): 726-736.
- [68] 沈安江,周进高,辛勇光,等.四川盆地雷口坡组白云岩储层 类型及成因[J].海相油气地质,2008,13(4):19-28. [Shen Anjiang, Zhou Jingao, Xin Yongguang, et al. Origin of Triassic Leikoupo dolostone reservoirs in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(4): 19-28. ]
- [69] 黄熙.四川盆地三叠纪盐盆富钾卤水富集规律[D].北京:中 国地质大学(北京),2013. [Huang Xi. The enrichment regularity of Triassic potassium-rich brines of the salt-bearing Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.]
- [70] 冯强汉,许淑梅,池鑫琪,等.鄂尔多斯盆地西部下古生界风 化壳优质储集层发育规律及成因机制:以桃2区块马家沟组马 五<sub>14</sub>亚段为例[J].古地理学报,2021,23(4):837-854.[Feng Qianghan, Xu Shumei, Chi Xinqi, et al. Development regularity and genetic mechanism of weathering crust reservoirs in the western Ordos Basin: Take the sub-members 1-4 of member 5 of

Majiagou Formation in Tao 2 block as an example[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23 (4): 837-854.]

- [71] Xiong Y, Tan X C, Dong G D, et al. Diagenetic differentiation in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin, China: Facies, geochemical and reservoir heterogeneity constraints[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 191: 107179.
- [72] Qiu X, Wang H M, Yao Y C, et al. High salinity facilitates dolomite precipitation mediated by *Haloferax volcanii* DS52 [J].
   Earth and Planetary Science Letters, 2017, 472: 197-205.
- [73] 王金艺,金振奎. 微生物白云岩形成机理、识别标志及存在的问题[J/OL]. 沉积学报:1-15[2021-10-19]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.135. [Wang Jinyi, Jin Zhenkui. Formation mechanism, identification markers, and questions regarding microbial dolomite[J]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-15 [2021-10-19]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.135.]
- [74] Meng F W, Zhang Z L, Schiffbauer J D, et al. The Yudomski event and subsequent decline: New evidence from  $\delta^{34}$ S data of Lower and Middle Cambrian evaporites in the Tarim Basin, western China [J]. Carbonates and Evaporites, 2019, 34(3): 1117-1129.
- [75] 赵海形,张永生,邢恩袁,等.陕北盐盆中奥陶统马五段蒸发 岩硫同位素特征及其古环境意义[J].地质学报,2018,92(8): 1680-1692. [Zhao Haitong, Zhang Yongsheng, Xing Enyuan, et al. Sulfur isotopic characteristics of evaporite in the Middle Ordovician Mawu member in the salt basin of northern Shaanxi and its paleoenvironment significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(8): 1680-1692. ]
- [76] Schoenherr J, Reuning L, Kukla PA, et al. Halite cementation and carbonate diagenesis of intra-salt reservoirs from the Late Neoproterozoic to Early Cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin)[J]. Sedimentology, 2009, 56(2): 567-589.
- [77] Hu A P, Shen A J, Yang H X, et al. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46 (5): 969-982.
- [78] Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, et al. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures [J]. Nature, 1995, 377 (6546) : 220-222.
- [79] Warthmann R, Vasconcelos C, Sass H, et al. Desulfovibrio brasiliensis sp. nov., a moderate halophilic sulfate-reducing bacterium from Lagoa Vermelha (Brazil) mediating dolomite formation[J]. Extremophiles, 2005, 9(3): 255-261.
- [80] Bontognali T R R, Mckenzie J A, Warthmann R J, et al. Microbially influenced Formation of Mg-calcite and Ca-dolomite in the presence of exopolymeric substances produced by sulphatereducing bacteria[J]. Terra Nova, 2014, 26(1): 72-77.

- [81] Vasconcelos P M, Renne P R, Becker T A, et al. Mechanisms and kinetics of atmospheric, radiogenic, and nucleogenic argon release from cryptomelane during <sup>40</sup>Ar<sup>39</sup>Ar analysis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(10): 2057-2070.
- [82] Caruso A, Pierre C, Blanc-Valleron M M, et al. Carbonate deposition and diagenesis in evaporitic environments: The evaporative and sulphur-bearing limestones during the settlement of the Messinian Salinity Crisis in Sicily and Calabria[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 429: 136-162.
- [83] Ruggieri R, Forti P, Antoci M L, et al. Accidental contamination during hydrocarbon exploitation and the rapid transfer of heavy-mineral fines through an overlying highly karstified aquifer (Paradiso Spring, SE Sicily) [J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 123-132.
- [84] Husinee A, Harvey L A. Late Ordovician climate and sea-level record in a mixed carbonate-siliciclastic-evaporite lithofacies, Williston Basin, USA [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, 561: 110054.
- [85] Gutiérrez F, Mozafari M, Carbonel D, et al. Leakage problems in dams built on evaporites. The case of La Loteta Dam (NE Spain), a reservoir in a large karstic depression generated by interstratal salt dissolution[J]. Engineering Geology, 2015, 185: 139-154.
- [86] 张水昌,朱光有,何坤. 硫酸盐热化学还原作用对原油裂解成 气和碳酸盐岩储层改造的影响及作用机制[J]. 岩石学报, 2011,27(3):809-826. [Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, He Kun, et al. The effects of thermochemical sulfate reduction on occurrence of oil-cracking gas and reformation of deep carbonate reservoir and the interaction mechanisms[J]. Acta petrologica Sinica, 2011, 27(3): 809-826. ]
- [87] 徐云强,易娟子,袁海锋,等. 川东龙门构造飞仙关组滩相储 层成岩作用及孔隙演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2021,48(3):326-336,376. [Xu Yunqiang, Yi Juanzi, Yuan Haifeng, et al. Diagenesis and pore evolution of Feixianguan Formation beach facies reservoirs in Longmen structure, eastern Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(3): 326-336, 376.]
- [88] 吴仕强,朱井泉,王国学,等. 塔里木盆地寒武一奥陶系白云 岩结构构造类型及其形成机理[J]. 岩石学报,2008,24(6): 1390-1400. [Wu ShiQiang, Zhu Jingquan, Wang Guoxue, et al. Types and origin of Cambrian-Ordovician dolomites in Tarim Basin[J]. Acta petrologica Sinica,2008,24(6): 1390-1400. ]
- [89] Hallenberger M, Reuning L, Schoenherr J. Dedolomitization potential of fluids from gypsum-to-anhydrite conversion: Mass balance constraints from the Late Permian zechstein-2-carbonates in NW Germany[J]. Geofluids, 2018, 2018: 1784821.
- [90] Budai J M, Lohmann K C, Owen R M. Burial dedolomite in the Mississippian Madison Limestone, Wyoming and Utah

thrust belt[J]. Journal of Sedimentary Research, 1984, 54(1): 276-288.

- [91] Arenas C, Zarza A M A, Pardo G. Dedolomitization and other early diagenetic processes in Miocene lacustrine deposits, Ebro Basin (Spain) [J]. Sedimentary Geology, 1999, 125 (1/2) : 23-45.
- [92] Sanz-Rubio E, Sánchez-Moral S, Cañaveras J C, et al. Calcitization of Mg-Ca carbonate and Ca sulphate deposits in a continental Tertiary Basin (Calatayud Basin, NE Spain) [J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(1/2): 123-142.
- [93] Rameil N. Early diagenetic dolomitization and dedolomitization of Late Jurassic and earliest Cretaceous platform carbonates: A case study from the Jura Mountains (NW Switzerland, E France) [J]. Sedimentary Geology, 2008, 212 (1/2/3/4) : 70-85.
- [94] Kenny R. Origin of disconformity dedolomite in the Martin Formation (Late Devonian, northern Arizona) [J]. Sedimentary Geology, 1992, 78(1/2): 137-146.
- [95] Meng F W, Ni P, Schiffbauer J D, et al. Ediacaran seawater temperature: Evidence from inclusions of Sinian halite[J]. Precambrian Research, 2011, 184(1/2/3/4): 63-69.
- [96] Horita J. Oxygen and carbon isotope fractionation in the system dolomite-water-CO<sub>2</sub> to elevated temperatures[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 129: 111-124.
- [97] Timofeeff M N, Lowenstein T K, da Silva M A M, et al. Secular variation in the major-ion chemistry of seawater: Evidence from fluid inclusions in Cretaceous halites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(8): 1977-1994.
- [98] McCaffrey M A, Lazar B, Holland H D. The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br and K<sup>+</sup> with halite[J]. Journal of Sedimentary Research, 1987, 57(5): 928-938.
- [99] 刘嘉庆,李忠,颜梦珂,等. 塔里木盆地塔中地区下奥陶统白 云岩的成岩流体演化:来自团簇同位素的证据[J]. 石油与天 然气地质,2020,41(1):68-82. [Liu Jiaqing, Li Zhong, Yan Mengke, et al. Diagenetic fluid evolution of dolomite from the Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin: Clumped isotopic evidence[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 68-82. ]
- [100] 郑浩夫,袁璐璐,刘波,等. 川西南中二叠统中粗晶白云石流体 来源分析[J]. 沉积学报,2020,38(3):589-597. [Zheng Haofu, Yuan Lulu, Liu Bo, et al. Origins of dolomitization fluids within Middle Permian coarse dolomite, SW Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(3): 589-597. ]
- [101] 文华国,周刚,郑荣才,等.四川盆地开江—梁平台棚东侧长 兴组礁白云岩沉积—成岩—成藏系统[J]. 岩石学报,2017, 33(4):1115-1134. [Wen Huaguo, Zhou Gang, Zheng Rongcai, et al. The sedimentation-diagenesis-reservoir Formation system of reef dolomites from Changxing Formation in the eastern of Kaijiang-Liangping platform-shelf, Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1115-1134.]
- [102] Haeri-Ardakani O, Al-Aasm I, Coniglio M. Fracture mineral-

ization and fluid flow evolution: An example from Ordovician-Devonian carbonates, southwestern Ontario, Canada[J]. Geofluids, 2013, 13(1): 1-20.

- [103] 钱一雄,尤东华,陈代钊,等. 塔东北库鲁克塔格中上寒武统 白云岩岩石学、地球化学特征与成因探讨:与加拿大西部盆 地惠而浦(Whirlpool point)剖面对比[J]. 岩石学报,2012,28 (8):2525-2541. [Qian Yixiong, You Donghua, Chen Daizhao, et al. The petrographic and geochemical signatures and implication of origin of the Middle and Upper Cambrian dolostone in eastern margin Tarim: Comparative studies with the Whirlpool point of the western Canada Sedimentary Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2525-2541. ]
- [104] 郑荣才,刘萍,文华国.川东北地区飞仙关组和长兴组白云 岩成因与成岩—成藏系统[J].成都理工大学学报(自然科学 版), 2017, 44 (1): 1-13. [Zheng Rongcai, Liu Ping, Wen Huaguo. Dolomite genesis and diagenetic-reservoir system of Feixianguan and Changxing Formation in northeast Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(1): 1-13. ]
- [105] Ning M, Lang X G, Huang K J, et al. Towards understanding the origin of massive dolostones [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 545: 116403.
- [106] Hardie L A. Dolomitization: A critical view of some current views [J]. Journal of Sedimentary Research, 1987, 57 (1): 166-183.
- [107] 胡光明,纪友亮,张亚京. 陆相盐湖层序地层学研究简述
  [J]. 盐湖研究,2006,14(1):55-59. [Hu Guangming, Ji Youliang, Zhang Yajing. Summarization on continental salt Lake sequence stratigraphy [J]. Journal of Salt Lake Research, 2006, 14(1): 55-59.]
- [108] Hsü K J, Schneider J. Progress report on dolomitization hydrology of Abu Dhabi sabkhas, Arabian Gulf[M]//Purser B
   H. The Persian gulf. Berlin, Heidelberg: Springer, 1973: 409-422.
- [109] Adams J E, Rhodes M L. Dolomitization by seepage refluxion[J]. AAPG Bulletin, 1960, 44(12): 1912-1920.
- [110] Badiozamani K. The dorag dolomitization model, application to the Middle Ordovician of Wisconsin [J]. Journal of Sedimentary Research, 1973, 43(4): 965-984.
- [111] Amthor J E, Mountjoy E W, Machel H G. Subsurface dolomites in Upper Devonian Leduc Formation buildups, central part of Rimbey-Meadowbrook reef trend, Alberta, Canada[J].
  Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1993, 41 (2) : 164-185.
- [112] Evans D G, Nunn J A. Free thermohaline convection in sediments surrounding a salt column [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B9): 12413-12422.
- [113] Vasconcelos C, McKenzie J A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil)[J]. Journal of Sedi-

mentary Research, 1997, 67(3): 378-390.

- [114] Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs [J]. Geochemical techniques for evaluating origin and distribution: AAPG Continuing Education Course Notes Series, 1993, 36: 129.
- [115] Tucker M E. Sequence stratigraphy of carbonate-evaporite basins: Models and application to the Upper Permian (Zechstein) of northeast England and adjoining North Sea[J]. Journal of the Geological Society, 1991, 148(6): 1019-1036.
- [116] Morrow D W. Synsedimentary dolospar cementation: A possible Devonian example in the Camsell Formation, Northwest Territories, Canada [J]. Sedimentology, 1990, 37 (4): 763-773.
- [117] Morad D, Nader F H, Morad S, et al. Limited thermochemical sulfate reduction in hot, anhydritic, sour gas carbonate reservoirs: The Upper Jurassic Arab Formation, United Arab Emirates [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 106: 30-41.
- [118] Boschetti T, Awadh S M, Al-Mimar H S, et al. Chemical and isotope composition of the oilfield brines from Mishrif Formation (southern Iraq): Diagenesis and geothermometry[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 122: 104637.
- [119] Amadi F O, Major R P, Baria L R. Origins of gypsum in deep carbonate reservoirs: Implications for hydrocarbon exploration and production[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(2): 375-390.
- [120] 陈磊,丁靖,潘伟卿,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡二叠系风城组云质岩优质储层特征及控制因素[J]. 中国石油勘探,2012,17(3):8-11. [Chen Lei, Ding Jing, Pan Weiqing, et al. Characteristics and controlling factors of high-quality dolomite reservoir in Permian Fengcheng Formation in west slope of Mahu Sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration,2012,17(3):8-11.]
- [121] Zhang J Z, Wang Z M, Yang H J, et al. Origin and differential accumulation of hydrocarbons in Cambrian sub-salt dolomite reservoirs in Zhongshen area, Tarim Basin, NW China
  [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 40-47.
- [122] Alqattan M A, Budd D A. Dolomite and dolomitization of the Permian Khuff-C reservoir in Ghawar field, Saudi Arabia[J].
   AAPG Bulletin, 2017, 101(10): 1715-1745.
- [123] Du J H, Pan W Q. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 360-374.
- [124] Yang H, Bao H P, Ma Z R. Reservoir-forming by lateral supply of hydrocarbon: A new understanding of the formation of Ordovician gas reservoirs under gypsolyte in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry B, 2014, 1(1): 24-31.
- [125] Liu H, Tan X C, Li Y H, et al. Occurrence and conceptual sedimentary model of Cambrian gypsum-bearing evaporites in the Sichuan Basin, SW China [J]. Geoscience Frontiers,

2018, 9(4): 1179-1191.

- [126] Huo F, Wang X Z, Wen H G, et al. Genetic mechanism and pore evolution in high quality dolomite reservoirs of the Changxing-Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 194: 107511.
- [127] Pierre F D, Clari P, Natalicchio M, et al. Flocculent layers and bacterial mats in the mudstone interbeds of the Primary Lower Gypsum unit (Tertiary Piedmont Basin, NW Italy): Archives of palaeoenvironmental changes during the Messinian salinity crisis[J]. Marine Geology, 2014, 355: 71-87.
- [128] 赵聪.川西地区雷口坡组微生物岩储层特征[D].成都:成 都理工大学,2019.[Zhao Cong. Characteristics of microbialites reservoir of Leikoupo Formation in the western Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.]
- [129] Beardsmore G R, Cull J P. Crustal heat flow: A guide to measurement and modeling[M]. Cambridge: Cambridge University of Press, 2001: 324.
- [130] 刘文汇,赵恒,刘全有,等. 膏盐岩层系在海相油气成藏中的 潜在作用[J]. 石油学报,2016,37(12):1451-1462. [Liu Wenhui, Zhao Heng, Liu Quanyou, et al. Potential role of gypsum strata series in marine hydrocarbon accumulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12): 1451-1462. ]
- [131] 王东旭,曾溅辉,宫秀梅. 膏盐岩层对油气成藏的影响[J].
  天然气地球科学,2005,16(3):329-333. [Wang Dongxu, Zeng Jianhui, Gong Xiumei. Impact of gypsolith on the formation of oil & gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 329-333.]
- [132] 朱光有,张水昌,梁英波,等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶 蚀改造:四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式
  [J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2182-2194. [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: An important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2182-2194.]
- [133] 王文楷,许国明,宋晓波,等.四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及其油气地质意义[J].成都理工大学学报(自然科学版),2017,44(6):697-707.[Wang Wenkai, Xu Guoming, Song Xiaobo, et al. Genesis of gypsum-salt in the Leikoupo Formation and its hydrocarbon significance in the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(6): 697-707.]
- [134] Zorina S O. Mineralogical composition of the Lower and Upper Kazanian (Mid-Permian) rocks and facies distribution at the Petchischi region (eastern Russian Platform) [J]. Carbonates and Evaporites, 2017, 32(1): 27-43.
- [135] Andreeva P V. Middle Devonian (Givetian) supratidal sabkha anhydrites from the Moesian Platform (Northeastern Bulgaria)

1341

[J]. Carbonates and Evaporites, 2015, 30(4): 439-449.

- [136] 颜开,刘成林,王春连,等. 刚果盆地西南部白垩纪蒸发岩矿物与古环境特征[J]. 岩石矿物学杂志,2021,40(3):525-534. [Yan Kai, Liu Chenglin, Wang Chunlian, et al. Mineral deposition and paleoenvironment of Cretaceous evaporite in Southwestern Congo [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021,40(3):525-534.]
- [137] 辛勇光,周进高,邓红婴.鄂尔多斯盆地南部下奥陶统马家 沟组沉积特征[J]. 海相油气地质,2010,15(4):1-5. [Xin Yongguang, Zhou Jingao, Deng Hongying. Sedimentary features of Lower Ordovician Majiagou Formation in the southern part of Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(4): 1-5. ]
- [138] 黄道军,钟寿康,张道锋,等. 蒸发背景沉积序列精细刻画及 沉积学解译:以鄂尔多斯盆地中部中奥陶统马五。亚段为例
  [J]. 古地理学报,2021,23(4):735-755. [Huang Daojun, Zhong Shoukang, Zhang Daofeng, et al. Datailed characterization and interpretation of sedimentary sequences under evaporitic environments: A case from the Ma5<sub>6</sub> submember of Middle Ordovician in central Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(4): 735-755.]
- [139] Sweet A C, Soreghan G S, Sweet D E, et al. Permian dust in Oklahoma: Source and origin for Middle Permian (Flowerpot-Blaine) redbeds in western Tropical Pangaea [J]. Sedimentary Geology, 2013, 284-285: 181-196.
- [140] 李建忠,谷志东,鲁卫华,等.四川盆地海相碳酸盐岩大气田形成主控因素与勘探思路[J].天然气工业,2021,41(6):13-26. [Li Jianzhong, Gu Zhidong, Lu Weihua, et al. Main factors controlling the formation of giant marine carbonate gas fields in the Sichuan Basin and exploration ideas[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 13-26.]
- [141] Arzaghi S, Khosrow-Tehrani K, Afghah M. Sedimentology and petrography of Paleocene-Eocene evaporites: The Sachun Formation, Zagros Basin, Iran [J]. Carbonates and Evaporites, 2012, 27(1): 43-53.
- [142] 吴海燕,梁婷,曹红霞,等.延安地区奥陶系马家沟组上组合 膏盐岩成盐沉积演化模式研究[J].地质学报,2020,94(12): 3819-3829. [Wu Haiyan, Liang Ting, Cao Hongxia, et al. Study of the salt-formation and sedimentary evolution model of the Upper Ordovician Majiagou Formation in the Yan'an area [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(12): 3819-3829.]
- [143] 裴森奇,王兴志,李荣容,等.台地边缘滩相埋藏白云石化作 用及其油气地质意义:论四川盆地西北部中二叠统栖霞组白 云岩的成因[J].天然气工业,2021,41(4):22-29.[Pei Senqi, Wang Xingzhi, Li Rongrong, et al. Burial dolomitization of marginal platform bank facies and its petroleum geological implications: The genesis of Middle Permian Qixia Formation dolostones in the northwestern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 22-29.]
- [144] 刘文栋,钟大康,尹宏,等. 川西北栖霞组超深层白云岩储层

特征及主控因素[J]. 中国矿业大学学报,2021,50(2):342-362. [Liu Wendong, Zhong Dakang, Yin Hong, et al. Development characteristics and main controlling factors of ultradeep dolomite reservoirs of the Qixia Formation in the northwestern Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 342-362.]

- [145] 刘志波,邢凤存,胡华蕊,等.四川盆地下奧陶统桐梓组白云岩 多元成因[J].地球科学,2021,46(2):583-599. [Liu Zhibo, Xing Fengcun, Hu Huarui, et al. Multi-origin of dolomite in Lower Ordovician Tongzi Formation of Sichuan Basin, western China[J]. Earth Science, 2021, 46(2): 583-599. ]
- [146] Husinec A, Bergström S M. Stable carbon-isotope record of shallow-marine evaporative epicratonic basin carbonates, Ordovician Williston Basin, North America[J]. Sedimentology, 2015, 62(1): 314-349.
- [147] 杨威,魏国齐,谢武仁,等.古隆起在四川盆地台内碳酸盐岩 丘滩体规模成储中的作用[J].天然气工业,2021,41(4):
  1-12. [Yang Wei, Wei Guoqi, Xie Wuren, et al. Role of paleouplift in the scale formation of intra-platform carbonate mound-bank body reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 1-12.]
- [148] 吴兴宁,吴东旭,丁振纯,等.鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云 岩地球化学特征及成因分析[J].海相油气地质,2020,25
  (4):312-318. [Wu Xingning, Wu Dongxu, Ding Zhenchun, et al. Geochemical characteristics and genetic analysis of Ordovician dolomites in the western margin of Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(4): 312-318.]
- [149] 魏柳斌,陈洪德,郭玮,等.鄂尔多斯盆地乌审旗—靖边古隆 起对奥陶系盐下沉积与储层的控制作用[J].石油与天然气 地质,2021,42(2):391-400,521.[Wei Liubin, Chen Hongde, Guo Wei, et al. Wushen-Jingbian paleo-uplift and its control on the Ordovician subsalt deposition and reservoirs in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 391-400, 521.]
- [150] 张永利,苗卓伟,巩恩普,等. 右江盆地都安组白云岩成因及 其地质意义[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(4):
  550-560. [Zhang Yongli, Miao Zhuowei, Gong Enpu, et al. Genesis of dolostone in Du'an Formation of Youjiang Basin and its geological significance[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(4): 550-560. ]
- [151] Fontes J C, Matray J M. Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts [J]. Chemical Geology, 1993, 109 (1/2/3/4) : 149-175.
- [152] Holland H D. The geologic history of sea water—an attempt to solve the problem [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1972, 36(6): 637-651.
- [153] Holland H D, Lazar B, McCaffrey M. Evolution of the atmosphere and oceans[J]. Nature, 1986, 320(6057): 27-33.
- [154] Harvie C E, Møller N, Weare J H. The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO<sub>4</sub>-OH-

 $HCO_3-CO_3-CO_2-H_2O$  system to high ionic strengths at 25 °C [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48 (4) : 723-751.

- [155] Millero F J. Thermodynamic and kinetic properties of natural brines[J]. Aquatic Geochemistry, 2009, 15(1/2): 7-41.
- [156] Shalev N, Lazar B, Köbberich M, et al. The chemical evolution of brine and Mg-K-salts along the course of extreme evaporation of seawater- An experimental study [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 241: 164-179.
- [157] Passey B H, Ji H Y. Triple oxygen isotope signatures of evaporation in lake waters and carbonates: A case study from the western United States[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 518: 1-12.
- [158] Sarg J F. The sequence stratigraphy, sedimentology, and economic importance of evaporite-carbonate transitions: A review
   [J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(1/2): 9-34.
- [159] Adachi N, Ezaki Y, Liu J B, et al. Late Ediacaran *Boxonia*bearing stromatolites from the Gobi-Altay, western Mongolia
   [J]. Precambrian Research, 2019, 334: 105470.
- [160] Bischoff K, Sirantoine E, Wilson M E J, et al. Spherulitic microbialites from modern hypersaline lakes, Rottnest Island, western Australia[J]. Geobiology, 2020, 18(6): 725-741.
- [161] Schopf J W, Farmer J D, Foster I S, et al. Gypsum-permineralized microfossils and their relevance to the search for life on mars[J]. Astrobiology, 2012, 12(7): 619-633.
- [162] Pierre F D, Natalicchio M, Ferrando S, et al. Are the large filamentous microfossils preserved in Messinian gypsum colorless sulfide-oxidizing bacteria? [J]. Geology, 2015, 43(10): 855-858.
- [163] Rouchy J M, Monty C. Gypsum microbial sediments: Neogene and modern examples [M]//Riding R E, Awramik S M. Microbial sediments. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 209-216.
- [164] Vai G B, Lucchi F R. Algal crusts, autochthonous and clastic gypsum in a cannibalistic evaporite Basin: A case history from the Messinian of northern Apennines [J]. Sedimentology, 1977, 24(2): 211-244.
- [165] Natalicchio M, Pellegrino L, Clari P, et al. Gypsum lithofacies and stratigraphic architecture of a Messinian marginal basin (Piedmont Basin, NW Italy) [J]. Sedimentary Geology, 2021: 106009.

- [166] 黄思静,黄喻,兰叶芳,等.四川盆地东北部晚二叠世—早三 叠世白云岩与同期海水锶同位素组成的对比研究[J]. 岩石 学报,2011,27(12):3831-3842. [Huang Sijing, Huang Yu, Lan Yefang, et al. A comparative study on strontium isotope composition of dolomites and their coeval seawater in the Late Permian-Early Triassic, NE Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(12): 3831-3842. ]
- [167] 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.]
- [168] 马永生,何治亮,赵培荣,等.深层一超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J].石油学报,2019,40(12):1415-1425.[Ma Yongsheng, He Zhiliang, Zhao Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1415-1425.]
- [169] 陈莉琼,沈昭国,侯方浩,等.四川盆地三叠纪蒸发岩盆地形 成环境及白云岩储层[J].石油实验地质,2010,32(4):334-340,346. [Chen Liqiong, Shen Zhaoguo, Hou Fanghao, et al. Formation environment of triassic evaporate rock basin and dolostone reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010,32(4): 334-340, 346. ]
- [170] 董杰.四川江油地区下三叠统飞仙关组碳酸盐岩成岩作用研究[D].成都:成都理工大学,2018. [Dong Jie. Diagenesis of carbonate rocks of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Jiangyou area, Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.]
- [171] 李峰峰,郭睿,刘立峰,等. 伊拉克M油田白垩系Mishrif组潟 湖环境碳酸盐岩储集层成因机理[J]. 地球科学,2021,46
  (1):228-241. [Li Fengfeng, Guo Rui, Liu Lifeng, et al. Genesis of reservoirs of lagoon in the Mishrif Formation, M oil-field, Iraq[J]. Earth Science, 2021, 46(1): 228-241.]
- [172] 夏青松,黄成刚,杨雨然,等.四川盆地高石梯—磨溪地区震 旦系灯影组储层特征及主控因素[J].地质论评,2021,67
  (2):441-458. [Xia Qingsong, Huang Chenggang, Yang Yuran, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of oil and gas accumulation of Dengying Formation, Sinian System, in Gaoshiti—Moxi area, Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2021, 67(2):441-458.]

## **Advances and Prospects of Dolostone-evaporite Paragenesis System**

WEN HuaGuo<sup>1,2,3</sup>, HUO Fei<sup>1,2,3</sup>, GUO Pei<sup>1,2,3</sup>, NING Meng<sup>1,2,3</sup>, LIANG JinTong<sup>1,2,3</sup>, ZHONG YiJiang<sup>1,2,3</sup>, SU ZhongTang<sup>1,2,3</sup>, XU WenLi<sup>1,2,3</sup>, LIU SiBing<sup>2,3</sup>, WEN LongBin<sup>1,2,3</sup>,

JIANG HuaChuan<sup>1,2,3</sup>

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
 Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Dolostone-evaporite paragenesis systems (DEPS) have been widely found in Precambrian to Quaternary strata worldwide. However, despite its wide spatio-temporal distribution, the formation mechanism and controlling factors of DEPS remain poorly studied. By reference to copious literature from China and elsewhere combined with previous knowledge of DEPS in China, this study comprehensively summarizes the development characteristics, combination patterns and formation mechanism of DEPS. Firstly, its spatio-temporal distribution is clarified based on published studies: laterally, DEPS is known to be widely distributed in 51 regions globally, mainly in the northern hemisphere (mostly in Asia, followed by Europe and North America). Comparatively, it is found less often in Africa and is only scattered in South America and Oceania. Stratigraphically, although DEPS is found in many Precambrian to Quaternary strata, it appears mostly in the Permian. The combination patterns of evaporite and dolostone in DEPS include the interbedding of dolostone and evaporite, with thick dolostone overlying thick evaporite, thick evaporite overlying thick dolostone, thick dolostone mixed with thin evaporite, and thick evaporite mixed with thin dolostone. The formation process, distribution and main controlling factors of symbiotic differences as well as the particularity and universality of the paragenetic system development are discussed. Secondly, based on macro- to microscale characterization of mineral types in DEPS, six types of evaporites and five types of dolostones have been found and their genesis is discussed. Finally, the properties, characteristics, sources and evolution paths of diagenetic fluids in DEPS are summarized. DEPS studies provide new concepts for solving the "dolostone (or dolomite?)" question, and promote the understanding of the important basic geological problems associated with DEPS. Such studies also provide theoretical guidance for the exploration of oil and gas resources in the paragenetic system.

**Key words**: dolostone; evaporite; paragenetic relationship; formation mechanism; main controlling factors; research progress; prospect