

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2018.01.010

湖相碳酸盐岩白云石化流体来源、 作用机制及物质过程

任雪瑶^{1,2}, 谭先锋^{1,2}, 张晨晨¹, 闫伟豪¹, 肖遥¹, 谭东萍¹, 周政达¹

(1. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331;

2. 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 湖相白云岩具有重要的油气地质意义, 广泛发育于我国东部新生代地层中。本文通过大量资料统计和分析前人对国内湖相白云岩的研究成果, 系统阐述了国内主要湖盆的湖相白云岩的成因、形成流体来源及相关物质的响应。根据白云石化流体的碳氧同位素、锶钡比、有序度、pH值、Eu异常、Ce异常等各类指标, 将白云石化流体分为原始湖泊、外来淡水、热水热液和海源流体等类型。不同类型流体来源改造下生成白云岩所伴生的矿物组合不同; 不同白云石化流体通过微生物作用、准同生作用、热液作用和埋藏作用等方式对原始碳酸盐岩进行白云石化作用, 不同白云石化作用机制直接制约了其物质响应过程。提出了未来利用定量分析技术深入开展白云石化流体来源分析、准确判断成岩流体类型或成岩作用机制是进一步研究的方向。

关键词: 白云岩; 白云石化; 流体来源; 物质响应; 湖相沉积

中图分类号: TE121.3 **文献标识码:** A

0 引言

近年来, 海相碳酸盐岩作为重要的烃源岩和储层类型(尤其是储层)而备受国内外学者的关注^[1-3]。相较于海相白云岩而言, 湖相白云岩的地质分布范围较小, 但随着对湖相碳酸盐岩的不断深入研究, 截至2012年已累计探明湖相碳酸盐岩油气田63个, 探明石油地质储量 5.97×10^8 t。目前中国陆上已获得油气发现的湖相碳酸盐岩储层主要分布在12个盆地, 从储层岩性来看, 湖相石灰岩、白云岩均有分布, 石油探明地质储量中石灰岩占76.7%, 白云岩占13.5%, 生物礁占9.8%。据此, 基于湖相碳酸盐岩尤其是湖相白云岩在油气勘探领域的重要意

义, 越来越多的学者开始关注湖相白云岩。

19世纪时期, 对湖泊沉积进行研究的学者较少, 湖相白云岩的研究尚处于停滞期, 在之后的几十年时间里, 很多学者利用先进的高级精密仪器对湖相白云岩进行系统的研究, 对白云岩的研究取得了一定的进展, 提出了几种具有代表性的流体来源: 正常海水, 经过蒸发浓缩或改造的海水、大气淡水、地层水、以及来自地下深部热液等^[4]; 总结出较为成熟的五种成因模式: 蒸发、渗透回流、热液以及埋藏白云化作用等成因模式^[5]。

世界范围内的湖相白云岩主要分布在古生代、中生代和新生代地层中。湖相白云岩在中国的古生代、中—新生代陆相沉积盆地中广泛发育, 主要分布在二叠系、侏罗系、白垩系、古近系和新近系。二叠系湖相白云岩主要分布在准噶尔、三塘湖等盆地, 是

收稿日期: 2017-11-20; 改回日期: 2018-01-05; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:41202043)、重庆科技学院优秀创新人才培养资助计划(编号:201606)、国家级大学生科技创新项目(编号:201711551001)和研究生科技创新项目(编号:YKJXCX1620134、YKJXCX1620136)联合资助。

作者简介: 任雪瑶(1995—), 女, 学士, 主要从事沉积地质与非常规石油地质方面研究。通信地址: 重庆市沙坪坝区大学城东路20号重庆科技学院石油学院; 邮政编码: 401331; E-mail: 616380920@qq.com

通信作者: 谭先锋(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事沉积地质与古环境方面研究。通信地址: 重庆市沙坪坝区大学城东路20号, 重庆科技学院石油学院; 邮政编码: 401331; E-mail: xianfengtan8299@163.com

以咸化湖盆沉积的白云岩及白云石类岩石为主;侏罗系湖相碳酸盐岩主要分布在四川、鄂尔多斯等盆地;白垩系湖相白云岩主要分布在松辽盆地、酒西盆地等,如松辽盆地嫩江组层状白云岩、酒泉盆地青西凹陷白垩系湖相热水沉积白云岩等;古近系湖相碳酸盐岩的发育达到全盛时期,白云岩同时也大量发育,如黄骅坳陷古近系沙河街组四段的多类型白云岩,柴达木盆地柴西地区始新统的咸化湖盆白云岩以及辽河盆地均有发现^[1,6-8];新近系我国湖相碳酸盐岩沉积相较古近系规模相对较小,湖相白云岩主要发育于柴达木盆地中^[9]。上述白云岩主要发育于潟湖、微咸水湖、盐湖、滨浅湖、半深湖-深湖、残留海湖盆等湖泊环境中^[10]。本文是在充分调研我国湖相白云岩研究的基础上,对白云石化过程的发生机理和物质响应等进行的系统总结。

1 流体来源

白云岩是由白云石为主要组成的沉积碳酸盐岩,白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)是沉积岩中常见的富镁碳酸盐矿物。由于原生沉积的白云石很难找到实例,故一般认为现有的白云岩多为次生交代灰岩形成^[11]。发生白云石化作用的先决条件是富镁流体流经或侵入碳酸盐岩地层^[4,12],但很多情况下由于判识标志不清晰等原因导致学者们对流体成因来源的认识存在分歧。建立不同成因作用机制的物质响

应模式的关键是弄清富镁流体的来源^[12-14]。

现以湖泊环境为背景,结合已有的研究成果将白云石化富镁流体来源归纳为原始湖泊、外来淡水、热水热液、入侵海水和残留海水五大类。在白云石化过程中,这些白云石化富镁流体在密度、压力差异,重力流作用,地热梯度差异等机制的作用下在碳酸盐地层形成环流,使流体在层间渗透、流动,为碳酸盐岩进行充分白云石化作用提供流体,尤其是镁离子^[15-16]。

1.1 原始湖泊流体

原始湖泊流体是指原始存在的淡水湖泊在温热、干旱、蒸发环境中水体不断蒸发浓缩,进而咸化而形成的白云石化流体(图1a)。

湖平面不断下降的同时湖泊的咸化度不断提高,随着蒸发强度的加剧、文石类矿物的大量析出,湖泊的上表层会形成高盐度的水体,高盐度的水体中会分异出 Mg^{2+} ,这些富镁的流体会成为白云石化作用的重要流体来源^[12,17]。湖体上部丰富的镁离子浓盐水流体可在重力作用下下沉至湖底,改变湖底白云石化矿物的饱和度,使其可以直接向下交代方解石形成因 Mg^{2+} 不足而导致的低有序度白云石,或穿过孔隙较为发育的碳酸盐岩地层时发生白云石化作用形成白云岩^[4,18]。在该流体来源模式下多在滨浅湖环境中产出白云岩。

咸化湖环境下的白云岩沉积以袁剑英等学者研究的柴西地区始新统下干柴沟组的湖相泥晶白云岩^[1]和准噶尔盆地二叠系芦草沟组上段湖相云质

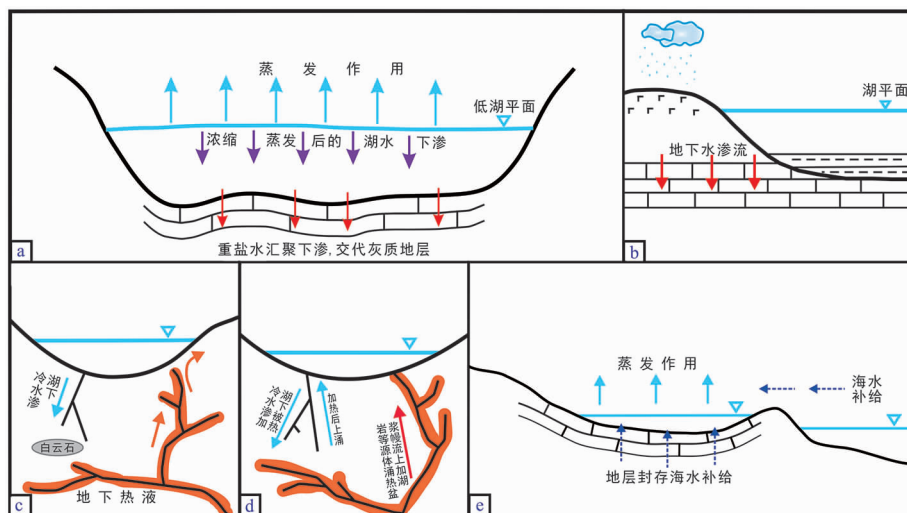


图1 不同流体来源成因图

Fig.1 Map showing genesis and source of different fluids

a. 原始湖泊来源^[18]; b. 外来淡水来源^[20]; c. 地下热液来源^[4]; d. 热水来源^[21]; e. 海源流体来源模式^[4]

将地下热水定义为沉积界面之下循环流动的热水^[27-28]。该热水一般为湖底富 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 流体,即热卤水。热卤水一般指由地热水溶解盐类沉积物或含盐地层,或者地下卤水接受正常地热梯度热源或其它热源加热形成的富含钙、镁、铁等金属离子的流体(见图 1c)。

热卤水产生的机制一般有两类:①沉积于海相、潟湖相、海陆交互相或陆相盐类沉积物在埋深过程中,受地热、压力等的影响,使其中各种形式的水和盐分释放而形成热卤水;②下渗的海水被异常地热加热而形成。深盆卤水沿基底断裂上涌,与沉积界面之下的围岩发生交代、充填作用,形成交代白云岩或白云石胶结物。

目前,国内发现的热水沉积白云岩较少,仅在内蒙古狼山地区中上元古界^[29]、内蒙古中部白云鄂博地区中上元古界和酒西盆地白垩统下沟组^[30-34]、内蒙古二连盆地白音查干凹陷有发现^[35-36],而新疆三塘湖盆地二叠系芦草沟组热水沉积岩则受到幔源物质影响。

(2) 地幔热液等深部流体

胡文瑄等关于盆地深部流体的研究中将深部流体划分为壳源热流体、烃源热流体和幔源热流体 3 种类型,将幔源流体定义为直接来源于地幔的流体^[13]。受现有研究程度的限制,笔者将此三类流体归为“地幔热液等深部流体”一类。地幔热液等深部流体是指在由构造控制的断裂系统较发育的地带,深部流体沿深大断裂垂向运移同时或沿微裂缝侧向运移形成一种富镁流体(见图 1d)。

此种深部流体可能来源于盆内湖水,冰冷的湖水循环往复地沿深大断裂下渗至地下深处被加热后再沿断裂折返喷出,也可能是受岩浆作用使深部热液如地幔热液直接上涌而形成。若是冷湖水加热,下渗的湖水有可能会与相接触的围岩发生水-岩反应,携带来自围岩中的镁、钙、钾、钠、铁等元素上移,在适宜条件下沉积白云石或直接发生白云石化作用;若是幔源流体,则以 CO_2 、 CO 和 H_2 为主(三者总含量多在 90% 以上),次要组分有 N_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等气体。地幔流体向上运移的过程中会使地壳中的超基性岩发生蛇纹石化,同时释放出大量的 Mg^{2+} 和 Fe 族金属元素,成为白云石化富镁流体的重要来源^[13, 37-40]。

沃里沃夫斯基^[41]最早在一些大型的有名油气田盆地的探索分析过程中提出过油气田中部分白云岩地层属于地幔等深部热液来源的观点;国内对于

地幔来源的热液流体研究相对较晚,但在新疆三塘地区、准噶尔盆地等地已有一定程度的研究。新疆三塘地区湖盆沉积的二叠系白云岩是由地幔热液主导,同时受湖水混染作用影响而沉积的热水喷流岩^[10, 37-38]。另外,准噶尔盆地西北缘风城组深湖一半深湖相“白烟型”云质热液喷岩部分样品流经球粒陨石标准化检测后反映沉积过程中有幔源流体参与^[42]。

幔源流体活动强烈的盆地多以富 CO_2 流体作用为特征,对于幔源流体的判识,可常利用萤石、片钠铝石和自生石英等特殊自生矿物组合的鉴定,流体包裹体的研究,以及 C、O、Sr 等同位素地球化学的测试分析,结合氦(He)、氩(Ar)等稀有气体同位素特征来进行对比分析^[13]。

1.4 海源流体

晚古生代海水大面积退出以前,我国海相地层广布,各类型白云岩分布较广,多发育于我国中西部地区,如塔里木、四川及鄂尔多斯三大盆地,且大多时代较老、埋藏较深,经历长期构造演化^[43-44]。由此,海洋环境适宜白云岩沉积。海西运动及印支运动后,海水大面积退出,国内各盆地逐渐转化为陆相沉积,此时,封存于已沉积地层中的海源流体——海水便成为湖相白云岩形成的一种重要的流体来源。因其不同作用来源方式,可分为入侵海水和残留海水两类。

(1) 入侵海水

在近海湖盆地区,海水上涨越过湖盆边缘的隆起部分侵入湖盆发生海侵,海水为近海的湖盆提供大量的 Mg^{2+} ,形成一种富镁流体^[45],称之为入侵海水。海水因其密度大,侵入湖水中下沉而产生滞水层,使其发生水化学分层现象,进而造成湖水垂向对流循环停止(见图 1e),使湖底呈现为还原状态,有利于白云岩的沉积^[46-47]。

受海侵作用影响下形成的白云岩,其 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值一般接近于同期海水的比值;若其还受到陆源硅铝质岩石或壳源物质等其它来源物质的控制,其 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值可能出现略高于同期海水的情况^[45]。我国的入侵海水来源下形成的湖相白云岩主要出现于渤海湾盆地歧口、东营、塘沽等中国东部盆地沙河街组^[3, 12, 45-46, 48]。

此类型白云岩,其 $\delta(^{13}\text{C})$ 为正值且总体偏大, $\delta(^{18}\text{O})$ 呈负值且总体偏低,白云石有序度偏低,其微量元素 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值、 $w(\text{V})/w(\text{Ni})$ 值一般均在海相范围内^[46, 49]。另外,还可通过微量元素、碳氧

同位素、溴氯比值等地球化学特征证实流体来源为海侵作用^[50]。

(2) 残留海水

早期残留下的海水再度改造、演化形成了新的海源流体即残留海水。该流体一般封存于海盆沉积形成的地层中^[21]。残留海水常在蒸发作用(有时还受火山作用等其它构造活动)的影响下提升盐度。封闭盐水的 $w(\text{Mg})/w(\text{Ca})$ 值随方解石沉淀而升高,从而为白云石化作用提供大量的富 Mg^{2+} 流体(见图 1e)。由断层控制循环对流的海水及残余蒸发卤水或是深层地下水或深层热卤水可沿断层或受构造挤压而上涌,可为白云石提供富 Mg^{2+} 流体^[51]。

鄂尔多斯盆地苏东地区^[21]、准噶尔盆地乌夏地区^[15]、川东兴隆场地区长兴组白云岩等均表现出受同期或早期浓缩海水影响的痕迹^[52]。由残余海演化而来的湖水因受海源流体的影响而表现出高盐度、 $\delta(^{13}\text{C})$ 值正偏、 $\delta(^{18}\text{O})$ 值负偏、Ce 负异常的特点。

由不同流体来源下白云石化矿物组合图(图 2)可见,不同流体来源下,受环境和流体内元素的影响,形成的矿物有所不同。石膏、硬石膏和铁白云石在各种流体下普遍有生成,不具有普遍性或代表性。

热水热液下主要生成苏打石、电气石、方沸石、钠沸石、重晶石、水镁铁石、硅硼钠石(水硅硼钠石)等;而海源流体主要生成黄铁矿、天青石、方沸石、锐钛石、钙芒硝、海绿石、胶磷矿、黏土矿物(蒙皂石、伊利石等)。

2 作用机制及物质响应

白云岩的形成机制是人们一直探讨和研究的问题,同时也是关于白云岩部分最难解决的问题,进一步了解白云岩的形成机制对成岩条件、沉积环境以及构建物质响应模式有着重要的意义。白云岩成因有原生与次生两种。其中,原生白云石多被认为与细菌、海胆等生物作用有关^[56](常用于解释缺乏次生交代证据白云石,如前寒武系白云岩),或强蒸发的潟湖环境下沉淀出的白云石^[57],或孔隙内壁胶结白云石成因^[4];交代白云岩形成最早由 Badiozamani^[58]、Adams^[59] 等提出了混合水、回流渗透等多种白云石化模式用于解释交代白云岩的成因,后来才逐步建立了准同生白云石化、埋藏白云石化、混合白

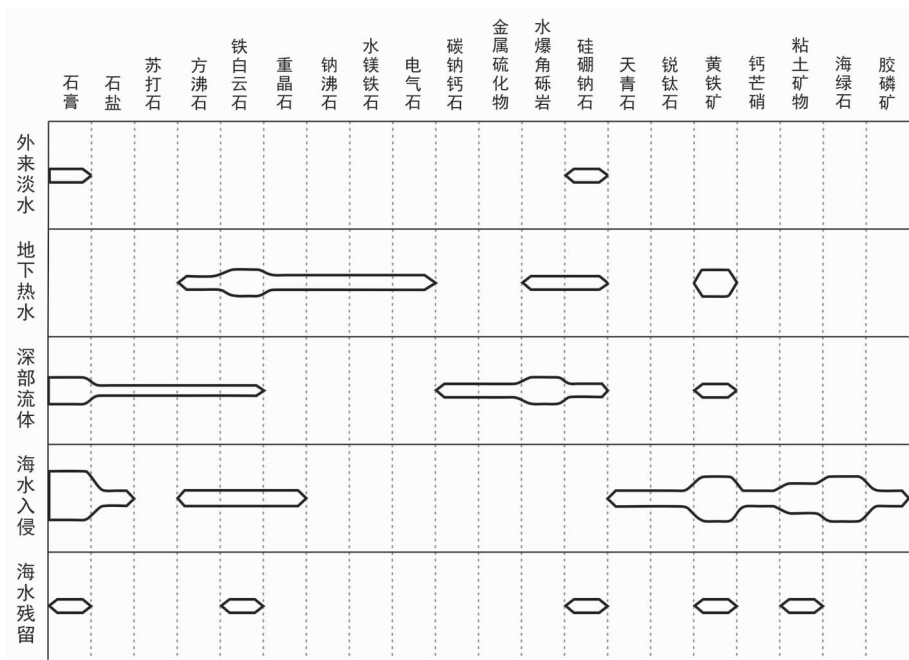


图 2 不同流体来源下白云石化矿物组合图

Fig. 2 Mineral assemblages of dolomites formed by differently sourced dolomitization fluid

(资料来源:外来淡水据文献^[25];地下热水据文献^[35-36,53];
深部热液据文献^[42,54-55];海水入侵据文献^[3,12,45,47-48,50];
海水残留据文献^[15,21])

云岩化,以及调整白云岩化、热液白云石化、玄武岩淋滤白云岩化^[11]成因模式。

本文通过研究目前较为成熟的白云岩成因模式,结合各地已有的研究成果,对湖相白云岩的形成机制进行归纳:我国东部湖盆沉积的白云岩多与新生代多次海侵作用有关,而中部内陆湖盆则主要受古气候的控制^[3,10,46];而对于微生物碳酸盐岩则主要发育于埋藏较深的古老地层中,以中新元古界、寒武系和奥陶系最为发育^[60-61]。

2.1 微生物成因

微生物白云岩的成因主要与环境、菌藻类生命活动两个因素有关。藻类生命活动及其生物体本身为白云石的沉淀提供了适宜的弱碱性沉积环境和较高的 $N(\text{Mg}^{2+})/N(\text{Ca}^{2+})$ 值,有利于白云石的形成^[62]。微生物的活动可消耗流体中的 SO_4^{2-} ,使 Mg^{2+} 离子释放出来形成富镁流体^[63],同时,由于微生物细胞壁及 EPS 均带负电荷,容易吸附金属阳离子,在其表面形成利于白云石沉淀的微环境,从而使白云石克服低温动力学障阻而沉淀^[10,32,64]。青海小柴旦盐湖莓球状白云石^[62]、新疆乌鲁木齐红雁池水库中二叠统芦草沟组黑色页岩中白云岩夹层^[10]等属于该类。

微生物成因下的白云石通常会形成独特的显微结构(粘膜状结构、纳米质点结构、纤维网状结构、放射状结构、簇状结构、纹层状结构等),具有不同于高温实验下形成的菱形白云石的球粒状、微管状、结核状、哑铃状或花椰状外形等微形态的白云石^[10,62];在不同微生物的作用及相应的环境下也会合成不同的副产物。目前湖相微生物白云石模式下形成的白云石物质响应较少,一般开展白云石的显微结构特征鉴定及环境分析。

2.2 准同生作用

准同生作用机制是一般在半干旱—干旱炎热气候的湖盆背景下,咸化的高盐度水体发生白云石化作用的模式。在这种模式下,气候干热,蒸发作用强烈,文石等表层沉积物的粒间水就不断向空气中蒸发,与此同时大气水、地下水等外来水体会不断地补充,在这些沉积物间会形成高盐度富 Mg^{2+} 卤水带^[65],富镁的粒间盐水或表层水与文石等沉积物相接触会促进文石等沉积物发生白云石化作用,多形成泥—微晶白云岩或者白云质灰岩^[3]。

准噶尔盆地西北缘二叠系风城组地区半深湖咸水白云岩、岐口凹陷湖相白云岩、柴西地区始新统湖相白云岩、东营凹陷沙四段湖相白云岩、东营凹陷东

部沙四下湖相白云岩、波斯湾萨布哈地区潮间带白云岩等均可用准同生作用模式来解释。

一般,准同生作用模式下主要形成微晶白云岩,伴随泥裂、鸟眼等构造,且常伴随有石膏等蒸发矿物生成产出^[4,13,25,66]。

2.3 回流渗透作用

回流渗透作用机制常发生于水体封闭性较好、内水体循环较差的局限环境中^[11]。在蒸发泵作用的基础上,当富镁流体将文石等表层沉积物基本白云化时,近海湖盆发生海侵、火山碎屑岩、下伏或共生的中、基性火山岩由于水解或风化作用等形成的富镁流体持续补充^[65],这些补充的富镁流体就会在重力作用的驱动下向下发生回流渗透,富镁的流体在向下伏空隙较大的地层渗透的过程中会接触石灰岩等碳酸盐沉积物,从而促使它们发生白云石化^[12,65]。该模式多用于解释局限洼地发育地区的湖相白云岩,如渤海湾盆地塘沽地区古近系沙河街组第一阶段形成的湖相白云岩、柴达木盆地现代盐湖区白云岩、昆特依盐湖区钾湖白云岩等。

回流渗透作用机制在干旱炎热条件下形成泥晶—粉晶质白云岩、微晶白云岩、砂糖状白云岩或者白云质灰岩,同时也可具有泥裂、鸟眼等构造。受盐湖环境控制的地区,常在洼陷地带沉积膏盐岩或与膏岩呈互层产出。当 Ca^{2+} 达到饱和时,首先沉积下来的是高镁方解石、文石及石盐、石膏、钙芒硝^[3,48],然后是石膏、石盐等蒸发矿物^[11-12,67-68]。在回流渗透机制下缓慢结晶形成的白云岩,一般有序度相对于准同生作用机制下形成的白云岩略微偏高^[3]。

2.4 热液作用

冷湖水沿深大断裂系统、逆冲推覆带等可渗透通道运移下渗至地下深处,被加热后再沿断裂折返喷出,循环往复;当热液来源为地幔热液等深部流体时,热液沿断裂体系等通道上移^[37,40,69]。当这些热液流体运移至浅层灰岩或白云岩中,交代断裂两侧及上覆的各类灰岩地层形成热液交代白云岩,或使白云岩发生重结晶或过度白云化^[37,70]。

内蒙古二连盆地白音查干凹陷下白垩统泥质白云岩、准噶尔盆地西北缘二叠系风城组斑状白云岩等的形成可以用热液作用机制对其进行解释。热液作用机制往往会伴随深大断裂、不整合等发生,形成的热液白云岩(斑状白云岩、鞍状白云岩等)具有交代残余结构、含有热液包裹体等特征。鞍状白云岩、铁白云岩也常认为是热液作用的结果^[71-72]。

湖相碳酸盐岩不同类型白云石化矿物组合特征

(表2)反映,构造热液成因白云石常与地下岩浆活动有关,且沿裂隙、断裂侵入的岩浆岩体周围常伴生黄铁矿、天青石等热液矿物,有时发生重结晶或过度白云化将形成胶结型鞍状白云石^[3,70];而地幔热液等深部流体下形成的白云岩,常以富含或含有铁白云石和伴生方沸石为特征,且交代多不充分,白云石自行程度低^[37]。

表2 湖相碳酸盐岩不同类型白云石化矿物组合

Table 2 Mineral assemblages of different lacustrine dolomites

作用机制 响应矿物	准同生作用	回流渗透作用	热液作用	埋藏作用
石膏	✓	✓		
石盐		✓		
钙芒硝	✓			
方沸石			✓	
铁白云石			✓	✓
硅质岩			✓	
重晶石			✓	✓
地开石			✓	
闪锌矿			✓	
黄铜矿			✓	
方铅矿			✓	
黄铁矿				✓
菱铁矿				✓
锐钛石				✓
黏土矿物				✓

2.5 埋藏作用

随着埋藏深度的加深,底层的沉积物受到上覆沉积物的压实作用释放的富 Mg^{2+} 流体将碳酸盐岩沉积物白云石化;或者在埋藏还原环境下,富含 Fe^{2+} 地下水在运移的过程中与周围已经沉淀的白云岩发生部分类质同象替换作用, Fe^{2+} 替换了 Mg^{2+} , 造成多余的 Mg^{2+} 通过压实作用形成流体且在运移过程中将围岩白云石化,形成铁白云石或富铁白云石^[11-12,23]。埋藏环境下的地层高温使白云石沉淀作用可以顺利进行。若是热液流体主导的埋藏白云岩化,热液可以通过裂缝、断层和节理等循环流动,从而形成白云石脉。常在石灰岩中形成沿缝面或岩溶缝发育分散的菱形状白云胶结物和晚期白云胶结物^[48]。

在埋藏作用机制下形成的湖相白云岩,白云石一般呈晶粒较大、晶面较粗的细晶为主的非面状晶体,具有波状消光的特点^[11,63]。在白云石化形成含铁白云石、菱形白云胶结物或白云石胶结物的过程中也会形成方沸石、绿泥石、伊蒙混石、伊利石等黏

土矿物,也会出现黄铁矿、重晶石、菱铁矿、锐钛石、方解石等矿物^[12]。

埋藏作用机制可用于解释中国潜江地区^[23]以及渤海湾盆地塘沽地区古近系沙河街组^[12]第二阶段形成的湖相白云岩。

3 结语与展望

(1)湖泊环境中,白云岩流体来源多样、形成模式丰富且各不相同,不同地区或层位的白云岩常是多种流体来源、形成机制的综合响应,同一地区或层位的白云岩在不同形成时期受不同的作用机制控制,加之成岩期后作用复杂,故对于解释湖相白云岩流体来源、形成机制尚未能够被广泛接受并在一定范围能应用的标准与模式^[54,73]。

(2)不同流体下、不同成岩作用机制下所对应响应生成的特征矿物不够明确,是否可以通过研究和建立不同流体下、不同成岩作用机制下所对应矿物的物质响应来辅助、定性判断成岩流体类型或成岩作用机制。

(3)定量的分析将有利于摸清浅层湖相白云岩的流体来源。借助电子探针、扫描电镜、能谱分析等技术对微量元素、同位素、稀土元素等进行分析,在浅湖相白云岩领域已取得了一定的突破,为流体来源、形成机制的解释提供了更可靠的依据。

参考文献:

- [1] 袁剑英,黄成刚,曹正林,等. 咸化湖盆白云岩碳氧同位素特征及古环境意义:以柴西地区始新统下干柴沟组为例[J]. 地球化学, 2015(3): 254-266.
- [2] 邱振,吴晓智,唐勇,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油资源评价[J]. 天然气地球科学, 2016(9): 1688-1698.
- [3] 李得立,谭先锋,夏敏全,等. 东营凹陷沙四段湖相白云岩沉积特征及成因[J]. 断块油气田, 2010(4): 418-422.
- [4] 赫云兰,刘波,秦善. 白云石化机理与白云岩成因问题研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010(6): 1010-1020.
- [5] 李振宏,杨永恒. 白云岩成因研究现状及进展[J]. 油气地质与采收率, 2005(2): 5-8+81.
- [6] 张文卿,陈建生,姜淑坤,等. 基于同位素水化学分析的松嫩平原大布苏湖流域地下水补给源研究[J]. 水资源保护, 2017(1): 9-14+16.
- [7] 黄福喜,杨涛,闫伟鹏,等. 中国致密油储层储集性能主控因素分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014(5): 538-547.
- [8] 王国栋,程日辉,王璞珺,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(1): 48-54+146.
- [9] 周海彬, 戴胜群. 南翼山新近系上统湖相碳酸盐岩储层微观孔隙结构及渗流特征[J]. 石油天然气学报, 2009(3): 42-45+12.
- [10] 李红, 柳益群. “白云石(岩)问题”与湖相白云岩研究[J]. 沉积学报, 2013(2): 302-314.
- [11] 朱筱敏. 沉积岩石学: 4版[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [12] 王兵杰, 蔡明俊, 林春明, 等. 渤海湾盆地塘沽地区古近系沙河街组湖相白云岩特征及成因[J]. 古地理学报, 2014(1): 65-76.
- [13] 胡文瑛. 盆地深部流体主要来源及判别标志研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016(5): 817-826+806.
- [14] 黄成刚, 袁剑英, 吴梁宇, 等. 湖相白云岩成因模式及研究方法探讨[J]. 岩性油气藏, 2016(2): 7-15.
- [15] 朱世发, 朱筱敏, 陶文芳, 等. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系风城组云质岩类成因研究[J]. 高校地质学报, 2013(1): 38-45.
- [16] WILSON A M, SANFORD W, WHITAKER F, et al. Spatial Patterns of Diagenesis during Geothermal Circulation in Carbonate Platforms [J]. *Amjsci*, 2001, 301(8): 727-752.
- [17] 吉云平, 王贵玲, 赵华, 等. 河北阳原盆地中更新世湖相地层顶部文石的发现及其科学意义[J]. 地学前缘, 2016(3): 178-185.
- [18] 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(1): 18-24.
- [19] 王冠民, 钟建华, 姜在兴, 等. 从济阳拗陷沙一段古盐度的横向变化看古近纪的海侵方向[J]. 世界地质, 2005(3): 243-247.
- [20] 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(3): 383-389.
- [21] 李凤杰, 杜凌晨, 赵俊兴, 等. 鄂尔多斯盆地苏东地区马家沟组五段5亚段白云岩成因[J]. 石油学报, 2016(3): 328-338.
- [22] 张亚奇, 马世忠, 高阳, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层沉积相分析[J]. 沉积学报, 2017(2): 358-70.
- [23] SHEN J, CHEN B, CHEN F, et al. Paleogene lacustrine dolomitization, Xingou region, southern Qianjiang Depression, China [J]. *Geosciences Journal*, 2016, 20(2): 183-197.
- [24] 李红, 柳益群, 朱玉双. 新疆三塘湖盆地二叠系湖相白云岩形成机理初探[J]. 沉积学报, 2007(1): 75-81.
- [25] 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(6): 685-692.
- [26] WHITE D E. Thermal Waters of Volcanic Origin [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1957, 68(12): 1637.
- [27] 陈先沛. 热水沉积成岩成矿作用的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1988, 7(2): 103-105.
- [28] 陈先沛, 高计元, 陈多福, 等. 热水沉积作用的概念和几个岩石学标志[J]. 沉积学报, 1992(3): 124-132.
- [29] 杨子元. 论白云鄂博矿床含矿围岩——白云岩的热水沉积成因[J]. 地质找矿论丛, 1994(1): 39-48.
- [30] 文华国. 酒泉盆地青西凹陷湖相“白烟型”热水沉积岩地质地球化学特征及成因[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [31] 文华国, 郑荣才, QING H, 等. 酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相热水沉积岩锶同位素地球化学特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 642-649.
- [32] 文华国, 郑荣才, QING H, 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(4): 591-604.
- [33] 文华国, 郑荣才, QING H, 等. 酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相热水沉积岩流体包裹体特征[J]. 地质学报, 2010, 84(1): 106-116.
- [34] 李乐, 姚光庆. 讨论: 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, 2016(3): 406-410.
- [35] 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(4): 587-595.
- [36] 郭强, 钟大康, 张放东, 等. 内蒙古二连盆地白音查干凹陷下白垩统湖相白云岩成因[J]. 古地理学报, 2012(1): 59-68.
- [37] 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(5): 861-867.
- [38] 柳益群, 焦鑫, 李红, 等. 新疆三塘湖跃进沟二叠系地幔热液喷流型原生白云岩[J]. 中国科学: 地球科学, 2011(12): 1862-1871.
- [39] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地中二叠统中-粗晶白云岩成因[J]. 石油与天然气地质, 2014(4): 503-510.
- [40] 李红, 柳益群, 张丽霞, 等. 准噶尔盆地东部中二叠统平泉组具“斑状”结构热水喷流沉积岩的成因及地质意义[J]. 古地理学报, 2017(2): 211-226.
- [41] 沃里沃夫斯基. 世界最大含油气盆地: “无花岗岩”型盆地的结构和地球物理参数[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [42] 常海亮, 郑荣才, 郭春利, 等. 准噶尔盆地西北缘风城组喷流岩稀土元素地球化学特征[J]. 地质论评, 2016(3): 550-568.
- [43] 马永生, 何登发, 蔡勋育, 等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. 岩石学报, 2017(4): 1007-1020.
- [44] 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.
- [45] 陈世悦, 李聪, 杨勇强, 等. 黄骅拗陷歧口凹陷沙一下亚段湖相白云岩形成环境[J]. 地质学报, 2012(10): 1679-1687.
- [46] 田景春, 尹观, 覃建雄, 等. 中国东部早第三纪海侵与湖相白云岩成因之关系——以东营凹陷沙河街组为例[J]. 中国海上油气地质, 1998(4): 34-38.
- [47] 孙钰, 钟建华, 袁向春. 惠民凹陷沙河街组一段白云岩特征及其成因分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2007(3): 78-84.
- [48] 黄鹏, 李雪, 郭瑞. 歧口凹陷沙一下亚段湖相白云岩岩石学

- 特征及成因分析[J]. 科技导报, 2014(2): 50-56.
- [49] 陈世悦, 王玲, 李聪, 等. 歧口凹陷古近系沙河街组一段下亚段湖盆咸化成因[J]. 石油学报, 2012(1): 40-47.
- [50] 吴靖, 姜在兴, 钱侃, 等. 山东省东营凹陷沙四上亚段咸化机制特征[J]. 地球学报, 2014(6): 733-740.
- [51] MCKINLEY J M, WORDEN R H, RUFFELL A H. Smectite in Sandstones: A Review of the Controls on Occurrence and Behaviour During Diagenesis[M]. Blackwell Publishing Ltd, 2003.
- [52] 成晓晔, 李平平, 邹华耀, 等. 川东兴隆场地区长兴组白云岩地球化学特征及流体来源[J]. 地质学报, 2013(7): 1031-1040.
- [53] 傅饶, 郑荣才, 常海亮, 等. 湖相“白烟型”喷流岩——新型的致密油储层类型——以准噶尔盆地西缘乌尔禾地区风城组为例[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 32-42.
- [54] 李红, 柳益群, 梁浩, 等. 新疆三塘湖盆地中二叠统芦草沟组湖相白云岩成因[J]. 古地理学报, 2012(1): 45-58.
- [55] 柳益群, 周鼎武, 焦鑫, 等. 一类新型沉积岩: 地幔热液喷积岩——以中国新疆三塘湖地区为例[J]. 沉积学报, 2013(5): 773-781.
- [56] SIBLEY D F, DEBOES R E, BARTLETT T R. Kinetics of dolomitization [J]. *Geology (United States)*, 1987, 12: 1112-1114.
- [57] WANAS H A. Petrography, geochemistry and primary origin of spheroidal dolomite from the Upper Cretaceous/Lower Tertiary Maghra El-Bahari Formation at Gabal Ataq, Northwest Gulf of Suez, Egypt [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 151(3-4): 211-224.
- [58] BADIOZAMANI K. The Dorag dolomitization model-application to the middle Ordovician of Wisconsin [J]. *Joursedimentpetrol*, 1973, 43(4): 965-984.
- [59] ADAMS M L R J E. Dolomitization by Seepage Refluxion [J]. *Aapg Bulletin*, 1960, 44(12): 1912-1920.
- [60] 翟秀芬, 汪泽成, 罗平, 等. 四川盆地高石梯东部地区震旦系灯影组微生物白云岩储层特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1199-1210.
- [61] RIDING R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology*, 2000, 47(s1): 179-214.
- [62] 李军鹏, 伊海生, 林金辉, 等. 青藏高原沱沱河地区新生代湖相白云岩特征及其环境意义[J]. 湖泊科学, 2008(5): 613-622.
- [63] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. 地质科技情报, 2006(5): 32-40.
- [64] FOLK R L. SEM imaging of bacteria and nannobacteria in carbonate sediments and rocks [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(5): 990-999.
- [65] 马立民, 李志鹏, 林承焰, 等. 东营凹陷沙四下盐湖相沉积序列[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014(6): 24-31.
- [66] 曲长伟, 林春明, 蔡明俊, 等. 渤海湾盆地北塘凹陷古近系沙河街组三段白云岩储层特征[J]. 地质学报, 2014(8): 1588-1602.
- [67] 裴松余, 卢兵力. 我国东部晚白垩世和早第三纪海侵与油气关系[J]. 地质论评, 1994(3): 229-236.
- [68] 栗维民, 梁浩. 三塘湖盆地上二叠统芦草沟组沉积环境[J]. 新疆石油地质, 2001(6): 497-498+455.
- [69] WARREN J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1-3): 1-81.
- [70] 李波, 颜佳新, 刘喜停, 等. 白云岩有机成因模式: 机制、进展与意义[J]. 古地理学报, 2010(6): 699-710.
- [71] ZENGER D H, RADKE B M, MATHIS R L. On the formation and occurrence of saddle dolomite; discussion and reply [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1980, 50(4): 1149-1168.
- [72] MACHEL H G, LONNÉE J. Hydrothermal dolomite—a product of poor definition and imagination [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3-4): 163-171.
- [73] 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(2): 207-213.

Source of dolomitization fluid, mechanism and material process of lacustrine carbonate rocks

REN Xueyao¹, TAN Xianfeng^{1,2}, ZHANG Chenchen¹, YAN Weihao¹,
XIAO Yao¹, TAN Dongping¹, ZHOU Zhengda¹

(1. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing
University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

2. Key Laboratory of Exploration and Development of Complex Oil
and Gas Fields in Chongqing, Chongqing 401331, China)

Abstract: Lacustrine dolomite is geologically important to petroleum. It is widely developed in eastern China in the Cenozoic strata. Based on statistics and analysis of a large number of research results of domestic lacustrine dolomite is expounded genesis of the main lacustrine dolomite formations in China and source of dolomitization fluid and related material response. According to carbon and oxygen isotopes, Sr/Ba ratio, order degree, pH value, anomaly of Eu and Ce the dolomitization fluid is sourced from the original lake, foreign freshwater, hydrothermal and marine fluid respectively. Dolomites are varied with different mineral assemblages means that they are formed by reworking of different soured fluids. Under microbial interaction, quasi syngenetic action, hydrothermal action and burial the original carbonate rocks are dolomitized and the mechanism of dolomitization restricts directly the process of material response. Finally, the future quantitative analysis technology should be used to further analyze the source of dolomitization fluid, and to determine the type of diagenetic fluid or the mechanism of diagenesis accurately.

Key Words: dolomite; dolomitization; fluid source; material response; lacustrine facies deposit