

碳酸盐白云化作用模式研究进展

胡作维,黄思静,张超,郎咸国,周桦

(成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,成都 610059;成都理工大学沉积地质研究院,成都 610059)

摘要:碳酸盐白云化作用是白云石(白云岩)成因研究中一个重要领域,对不同碳酸盐白云化作用模式的总结和应用是白云石(白云岩)成因研究的重要内容之一,因而,进一步深入理解目前已有的不同碳酸盐白云化作用模式,将对今后更好地应用和改进现有的模式、甚至总结全新的模式都有重要的现实意义。在大量国内外文献资料分析的基础上,较系统地总结了目前国际上已有的经典碳酸盐白云化作用模式——近地表(浅埋藏)白云化作用模式(萨布哈模式、渗透回流模式、混合水模式)、中—深埋藏白云化作用模式(压实驱动模式、构造挤压模式、地形补给模式、热对流模式)、热液白云化作用模式和微生物白云化作用模式等研究的发展现状和存在问题。

关键词:碳酸盐;白云石;白云化作用;成岩作用

中图分类号:P588.2;P595 文献标志码:A

自 1791 年法国博物学家 Dolomieu 首次详细描述白云石以来^[1],地质学家们一直在通过野外和实验室的各种方法努力研究“白云石(白云岩)”。尽管白云石在古代台地碳酸盐岩中很常见,但在全新世沉积物中却很少见,同时在地表温度下如果没有细菌的媒介作用参与,实验室几乎不可能人工合成沉淀出白云石^[2],因而人们不能通过简单的室内化学反应来解决时空分布如此广泛的白云石(白云岩)的成因问题,这就是所谓的“Dolomite Problem”。关于白云石(白云岩)成因问题,人们更关心近地表自然条件下是否可以直接沉淀具超结构的原生白云石。多年来,人们只在澳大利亚南部 Coorong 潟湖中找到了以化学沉淀方式直接从湖水中沉淀出来的原白云石^[3],其化学成分范围在 $Ca_{50}Mg_{50}$ 到 $Ca_{56}Mg_{44}$ 之间,但绝大多数不具超结构^[4],并不是真正意义上的白

云石,且有学者认为其中部分白云石是卤水交代文石的结果^[5],因而在现代地表条件下几乎很难有原生白云石的直接沉淀。既然现代白云石与化学沉淀没有过多的直接联系,那么古代地层中大量的白云石和白云岩是如何出现的?它们来自哪里?目前,尽管人们对“白云石问题”的理解依然模糊不清,但世界上多达 50% 以上、北美接近 80% 的油气碳酸盐岩储层都是白云岩储层^[6],同时绝大多数具有经济价值富集铅锌的密西西比河谷型(MVT)矿床也是以白云岩作为主岩,很多砂卡岩矿床也一样^[7],因而,认识和理解各种形态的白云石(白云岩)具有显而易见的迫切性和必要性。

白云化流体交代先驱沉积碳酸盐矿物形成白云石的过程被称为白云化作用(包括白云石化作用、白云岩化作用,全文同),相应的物理化学环境、 Mg^{2+} 来源以及水文动力学机制等因素的有机集合被称为白云化作用模式。通过对世界上许多地区现代白云石和古代白云岩的大量研究,目前人们已经积累了大量矿物学、岩石学、地球化学、沉积学和水文学等领域的基础资料,总结了一系

收稿日期:2011-04-19

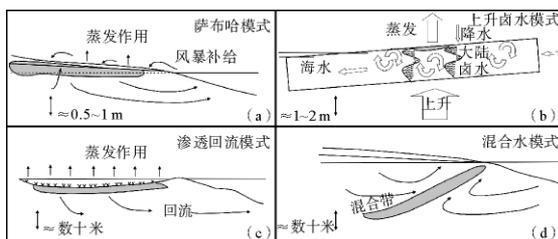
基金项目:国家自然科学基金资助项目(40839908,40672072);教育部博士点基金资助项目(20050616005)

作者简介:胡作维(1981—),男,博士,讲师,主要从事沉积地质学专业的教学与科研工作。E-mail: huzuowei@yahoo.com.cn

列不同的白云化作用模式来解释白云岩的成因^[2,6,8]。这些白云化作用模式分别体现了不同地区不同层位相应白云岩的形成机制,因而某一白云化作用模式本身具有先天的特殊性,并导致了其多样性。不同白云化作用模式的归类方式也是多种多样,诸如以发生时间、 Mg^{2+} 来源、发生深度或水文动力学机制等方式进行归类。笔者根据不同白云化作用的可能发生深度对目前已有的白云化作用模式进行了归类,包括近地表(浅埋藏)白云化作用模式(萨布哈模式、渗透回流模式、混合水模式)、中—深埋藏白云化作用模式(压实驱动模式、构造挤压模式、地形补给模式、热对流模式),还有一些白云化作用的可能发生深度不确定,如热液、微生物白云化作用模式等。对于白云化机理与白云岩成因问题的研究现状,国内已有前期文献进行了综述^[9-11],但多限于介绍不同白云化作用模式的基本情况和应用方向,较少涉及不同碳酸盐白云化作用模式的真实性和适用性等核心问题。这些问题的进一步探索,将对今后更好地应用和改进现有的、甚至总结全新的白云化作用模式都有重要的现实意义。

1 近地表(浅埋藏)白云化作用模式

近地表(浅埋藏)白云化作用模式是基于近地表成岩条件和白云化环境下建立的,成岩时间包括准同生和浅埋藏成岩阶段,白云化流体主要是蒸发海水或者海水与淡水的混合水等,发生环境主要涉及浅滩(或障壁岛)—潟湖—潮坪环境等。典型的近地表(浅埋藏)白云化作用模式包括萨布哈模式、渗透回流模式、混合水模式等(图1)。



(a)、(c)、(d)据文献^[2]; (b)据文献^[12],略有修改;

图中阴影部分为白云石可能形成区域

图1 近地表(浅埋藏)白云化作用模式

Fig. 1 Schematic diagrams of near-surface and shallow subsurface dolomitization models

1.1 萨布哈模式

萨布哈(Sabkha)是指在阿拉伯湾南部和西部边缘发育的蒸发潮沼^[2],萨布哈模式的标准地点是阿布扎比 Trucial 海岸的萨布哈,该地区可能是目前研究最为深入的现代超咸水潮间—潮上潮沼,也是丰富回流白云石形成的典型地区,而在别处的萨布哈并没有那么多的白云石产出^[8]。在阿布扎比 Trucial 海岸的萨布哈,由于具有温度高、温度差和湿度差变化大等非单一干旱气候特征,文石泥等沉积物中孔隙水经强烈蒸发而逐渐浓缩,同时外围水体(主要包括海水或大陆卤水)不断补充,在这些沉积物中间形成了一个高盐度富 Mg^{2+} 卤水带(表1)。随着高盐度卤水中石膏和其他一些盐类矿物沉淀,卤水的 Mg/Ca 比值逐渐增大,并促使沉积物中文石或方解石发生白云化作用或孔隙水直接沉淀原白云石(图1a)。在萨布哈的现代潮间/潮上沉积物中常见有少量微晶白云石,但这些微晶白云石也可产出于阿拉伯湾潮下沉积物中^[13]。

目前,虽然不少学者对萨布哈出现的微晶白云石取得了较多共识,但在补充水体的来源和补给动力学过程、次生交代或原生沉淀成因等方面仍存有争议。实际上,大多数学者从一开始就认为海水是萨布哈外围补充水体,但 Wood 等^[12]从同位素地球化学、溶质成分、溶质和水通量等方面研究认为,大于95%的溶质来自于上升的大陆卤水,大约90%的每年输入水是直接降水(其余约10%来自横向和上升的地下水流动)。萨布哈水文循环中不同来源水体的补给动力学过程更复杂,既有早期的毛细管力^[14]、海水洪泛^[15]、蒸发泵吸^[16],也有后来的2个或多个上述过程的组合,如洪水补给—蒸发泵吸^[17]。McKenzie 等^[18]认为萨布哈的水文循环经历了3个连续阶段:风暴驱动海水洪泛、毛细管蒸发和蒸发泵吸;而 Wood 等^[12]则认为大气降水、地下水的横向和上升流动、蒸发作用是萨布哈水文循环的主要过程(图1b)。对于萨布哈微晶白云石的成因研究,早期多认为是高 Mg/Ca 比值卤水交代沉积物中文石或方解石的结果^[14,16],被替换的 Ca^{2+} 进入到孔隙水中(表1);但后来通过透射电子显微镜(TEM)和扫描电子显微镜(SEM)分析结果认为阿布扎

比萨布哈中大多数白云石实际上是从孔隙水直接沉淀的而不是先驱文石的交代产物^[13,19],只有少数白云石在晶体尺度观察后被认为是直接交代文石形成的,那些以胶结物形式出现的微晶白云石都是由不同大小孔隙中超咸流体沉淀的,有的孔

隙甚至可小至几微米^[13]。不过,近年也有研究认为萨布哈的一些微晶白云石与微生物白云化作用之间很可能存在紧密联系^[20],在孔隙水趋于还原并因细菌硫酸盐还原和(或)微生物产生甲烷导致碱性增强的地方,白云化作用最为强烈^[8]。

表 1 不同碳酸盐白云化作用模式的一些特征

Table 1 Main features of different dolomitization models

碳酸盐白云化作用模式		发生深度	主要流体通道	Mg ²⁺ 来源	Ca ²⁺ 流向
近地表 (浅埋藏)	萨布哈模式			海水或大陆卤水	孔隙水
	渗透回流模式	< 600 m?	孔隙	海水	广海水
	混合水模式			海水	广海水
中—深埋藏	压实驱动模式			海源流体	地下水
	构造挤压模式			地层流体	地下水
	地形补给模式	> 600 m?	孔隙或断裂	穿越地层大气水	地下水
	台地热对流模式			海水	广海水
	盆地热对流模式			地层流体	地下水
热液模式	任意	断裂	地层流体	地下水	
微生物模式	数米?	孔隙	海水	孔隙水	

1.2 渗透回流模式

该模式是 Adams 和 Rhodes^[21] 在解释德克萨斯州西部二叠系卡匹敦阶生物礁复合体中白云岩的成因时首先提出的。由于存在生物礁或浅滩等障壁,被障壁封闭或半封闭的潟湖海水经蒸发浓缩形成高盐度富 Mg²⁺ 卤水(表 1),卤水浓度不断升高、密度也相应不断增大(可以达到 1.2 g/cm³);而后在重力作用下,这些密度较大的卤水下渗至高渗透性台地沉积物中,并向海一侧持续流动直至回到广海(图 1c),被替换的 Ca²⁺ 也随之回到广海(表 1)。在回流过程中,高 Mg/Ca 比值的卤水与渗流通道附近的台地文石或方解石沉积物发生交代白云化作用。渗透回流模式较好地解决了 Mg²⁺ 来源和水文循环机制等问题,因而得到了不少学者的认同,常被用来解释整个碳酸盐台地、甚至整个沉积盆地出现的广泛白云化作用^[22,23]。近年,部分学者通过数值模拟方法进一步深化了人们对渗透回流模式的认识,证实了该模式发生的可行性并扩大了其应用范围,同时也限定了该模式的白云化程度和白云岩形成数量^[22,24-26]。在热带地区岛屿中,与超咸水条件有关的局限卤水回流显然正在形成全新世白云石,如西班牙 Canary 岛 Fuerteventura 海岸

线^[27]、哥伦比亚 San Andres 海岸线^[28]、约旦 Aqaba 湾 Solar 湖^[29]、埃及 Sinai 半岛 Ras Mohammed 海岸现代边缘^[30]等。

尽管渗透回流模式已经在实例分析、数值模拟甚至简易实验中得到证实,但长期作为渗透回流模式经典实例的加勒比海南部 Bonaire 岛 Pekelmeer 潟湖石膏层之下更新世—上新世碳酸盐的白云化作用^[31],并没有像原来料想的那样真实存在,甚至在潟湖之下也没有发现回流的卤水^[32],相应的潟湖水文循环机制也与原来料想的基本相反:1 层渗透性较低的薄层黏土火山灰分隔了较高盐度和正常盐度的潟湖沉积物,但在火山灰层被破坏或缺失的地方会出现向盐沼供应海水的泉水,上涌作用是 Pekelmeer 潟湖水文循环的主要机制,而非回流作用。当然, Pekelmeer 潟湖在个别时间也可能发生回流作用,但不可能有足够的卤水体积形成交代白云石^[33,34]。此外,渗透回流模式在一些问题的理解上也过于理想化,如卤水来源与补给过程、回流通道的持续性与差异性等方面。一般认为经蒸发浓缩而达到一定 Mg/Ca 比值的海水是渗透回流模式的白云化流体,原始海水、混合了海水的大陆水或大气淡水都有可能成为蒸发盆地的卤水,但 Ca<SO₄²⁺ 或 Ca>

SO_4^{2+} 决定了蒸发浓缩后流体的 Mg/Ca 比值变化,只有 $\text{Ca} < \text{SO}_4^{2+}$ 的水体才会满足 Mg/Ca 比值较快增加的需要^[2]。同时,封闭孤立的局限台地中蒸发潟湖卤水的补给过程也不是十分清楚。Adams 和 Rhodes^[21] 最早提出的经典渗透回流模式对卤水的补给并没有给予更多关注。近年研究认为不断积聚蒸发岩的沉积区域表面并未与广海直接连通,大部分海水需要通过穿越卤水湖或卤水水道边缘的地下天然渗透通道向局限台地(潟湖)流入^[2],但这也需要注意渗流通道的地区特殊性——不同地区局限台地可能有着不同的水体补充渗流通道。同时,数值模拟研究表明渗透回流白云化作用显然不是均一地叠加在所有台地灰岩之上^[22,24],甚至回流也不是人们想象中的简单。中等盐度流体的回流可以向下渗透到最初的经典回流模式所没有预想到的几百米深度而被称为隐伏回流,经典回流则被称为活跃回流^[24,25],即不同位置的回流存在着流动性质的差异。在渗透回流白云化作用过程中,只有在具有非常高的渗透率且不含有效隔水层(如泥页岩和蒸发岩层)的台地上,并且回流时间相对较长才能被完全白云化^[24,25],而这样的台地在自然界中并不多见,至少在现代沉积环境中很少见,且当泥质、石膏等沉积物层成为有效隔层并抑制卤水向深部渗透和回流、海水吸入时,近地表的卤水和海水的流失也将使白云化作用难以在更大深度发生^[35],因而,渗流通道的连续性和高效性及其控制机制也是我们应该关心的。事实上,渗透回流白云化作用往往需要较长时间大规模稳定水文体系来支撑大量回流白云岩的形成,而这个“较长时间”一般是百万年的时间尺度,如 Jones 等^[24] 的模拟时间超过了 1.6 Ma,如此长时间大规模稳定水文体系的保持机制及其与台地生长、海平面变化之间的耦合关系均尚不清楚。

1.3 混合水模式

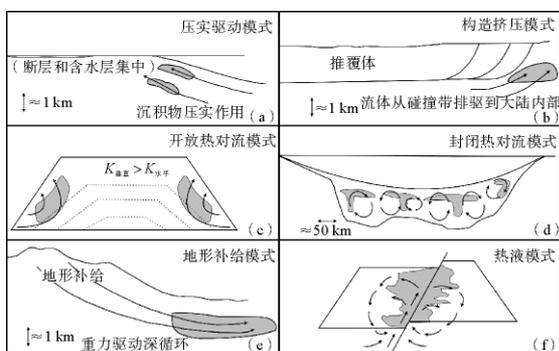
正如前面所描述的,不论是萨布哈模式还是渗透回流模式,都需要干热的气候、强烈的蒸发作用以及由此形成的高 Mg/Ca 比值卤水,以至于有学者认为白云石就是一种蒸发矿物^[36],但一些广泛分布在陆表海碳酸盐台地环境的白云岩并没有邻近蒸发岩产出,也缺乏潮上暴露标志,因而缺乏足

够证据来说明其与蒸发作用之间存在关联。针对某些白云岩出现在现代台地边缘淡水—海水混合区域,Hanshaw 等^[37] 率先使用混合水(包括 Mixing zone、Dorag,全文同)模式解释佛罗里达古新世—早中新世灰岩含水层中白云岩的成因,Land^[38] 也将其用于解释牙买加北部中更新世生物礁的同生白云化作用,随后 Badiozamani^[39] 通过计算认为海水占 5%~30% 的混合水对方解石不饱和而对白云石过饱和,在出现这些比例混合水的区域可以发生白云石交代方解石,他同时将这一结果应用到威斯康辛州西南部中奥陶统白云岩的成因解释上,并将该模式命名为 Dorag 模式(图 1d)。实际上,混合水模式中 Mg^{2+} 来源仍然是富 Mg^{2+} 的海水,被替换的 Ca^{2+} 随循环水回到广海(表 1)。

从混合水模式建立的早期,已有较多学者对大气水—海水混合带中大范围台地白云化作用发生机制的合理性提出了质疑^[40,41]。如果使用现代环境中沉淀的、更易溶解的无序白云石的溶度积(平衡常数 $\approx 10^{-16.5}$)而不使用基于古代有序白云石的溶度积(平衡常数 $\approx 10^{-17}$),那么适合混合水白云化作用的流体成分范围将大大减少,只有在海水占 30%~41% 的混合水中才会出现^[40],即发生混合水白云化作用的流体成分要求变得比较苛刻。其后,一些混合水模式的典型实例也被修改为海源流体白云化作用的结果,如北大西洋巴巴多斯岛 Golden Grove 和牙买加北部新近系 Hope Gate 组的白云岩^[41,42]。Machel^[8] 从热力学、动力学和水文学 3 方面认为混合水模式缺乏足够的基础,同时,新近的巴哈马滩和佛罗里达南部近地表混合带研究表明,海水—淡水混合带中不含白云石,即使是文石已经处于不饱和状态^[43];随后,Luczaj^[44] 更是在包裹体、岩相学、稳定同位素和有机质成熟度等分析基础上,彻底否认了威斯康辛州中奥陶统白云岩是 Badiozamani^[39] 原先认为的混合水成因的观点,认为它们是热液白云化作用的结果。尽管对混合水模式的质疑声此起彼伏,但 Machel^[8] 并没有完全否定混合带中可以形成白云石,只是认为混合带形成白云石的能力有限,形成的白云石体积相对较小、且仅限于台地边缘;当在更大的盐度区间(如海水大于 70%),白云石通常含量非常少(只有百分之几的体积分数),且作为薄的胶结边或交代边出现。

2 中—深埋藏白云化作用模式

随着沉积物或沉积岩埋深的持续增加,它们逐渐脱离近地表环境的影响而进入到中—深埋藏环境中,孔隙流体化学性质已不再完全受控于地表或近地表过程,而是受控于地下成岩过程,水—岩相互作用已经在很大程度上改变了原有的孔隙流体。然而,目前近地表(浅埋藏)环境与中—深埋藏环境之间的深度界线缺乏明确定义,不同学者提出的深度界线也不尽相同,如 500 m^[45]、~600 m^[46]、>600~1 500 m^[47,48]。事实上,所有埋藏白云化作用模式在本质上都是水文学模式,它们大体在流体流动的驱动力和驱动方向上存在差异,有关模式主要包括压实驱动模式、构造挤压模式、地形补给模式、热对流模式等(图 2)。这些埋藏白云化作用模式显著不同于前面基于近地表成岩条件下建立的近地表(浅埋藏)白云化作用模式,因为:(1)白云化流体已经不是直接来源于蒸发海水或混合水,可能包括细粒沉积物中的孔隙水和吸附水、地层流体、基底流体、大气淡水等;(2)流体驱动力不是简单的流体密度差,可能包括地层超压、构造挤压、水头压力、热对流等驱动机制。



(a)、(b)、(c)据文献[2];(c)、(d)、(f)据文献[8];

图中阴影部分为白云石可能形成区域

图 2 中—深埋藏、热液白云化作用模式

Fig. 2 Schematic diagrams of intermediate-deeply buried and hydrothermal dolomitization models

2.1 压实驱动模式

压实驱动模式是最早提出的中—深埋藏白云化作用模式^[49],随着埋藏深度逐渐增加,松散沉积物中孔隙流体在上覆载荷的增加过程中逐渐压

实脱水,一些富 Mg^{2+} 压实流体(主要是一些与海水有关的富 Mg^{2+} 海源流体,见表 1)进入到邻近渗透性较好的灰岩,并将其白云化(图 2a),被替换的 Ca^{2+} 进入到地下水中(表 1)。然而,从质量平衡计算可知,这些有限的埋藏压实流体只能形成规模较小的白云岩地质体,与之相关的白云化作用主要是局部范围的^[8]。此外,也有可能发生在区域—盆地尺度上,此时压实流体在典型不对称盆地(如前陆盆地)中主要以向上和向外的方式横向通过含水层,并沿流动通道聚集^[50],可以为白云化作用供应数量巨大的 Mg^{2+} ,尤其是那些只有个别可渗透性区域的地质单元,如流体聚集的碳酸盐台地边缘。压实驱动白云化过程可能比我们一般认识的更为普遍,有关实例如美国密歇根志留系生物礁^[51]、加拿大阿尔伯达上泥盆统生物礁^[52]、加拿大阿尔伯达 Rimbey-Meadowbrook 生物礁^[8]等,尤其是 Rimbey-Meadowbrook 生物礁,已有大量资料支持压实驱动海水的聚集以及/或者来自 Antler Orogen 前陆盆地远端下倾部分地层流体的长距离排驱^[53]。

虽然压实驱动模式提出较早,但该模式在压实流体来源和规模、 Mg^{2+} 供应数量等方面仍存有不足,故其应用多限于来自盆地方向的压实流体对碳酸盐台地边缘可渗透地质体的白云化作用,如生物礁或鲕粒浅滩等。实际上,由于多数压实流体更倾向于向上运动^[54],因而,压实驱动模式中孔隙流体的长距离运移很难完成,或者说,缺少大规模压实流体的横向运动,无法确定大规模白云化作用需要的压实流体的来源和规模。同时,盆地沉积物中缺乏持续不断的流体来源供应足够的 Mg^{2+} ,Morrow^[55]通过计算认为,1 cm³横向邻近灰岩的白云化作用需要几百立方厘米页岩的压实,Given 和 Wilkinson^[56]通过质量平衡计算认为,密歇根盆地中来自黏土的 Mg^{2+} 只能解释大约 10%白云岩的成因,即泥岩地层中没有足够的 Mg^{2+} 进行大规模白云化作用,因而压实驱动模式的 Mg^{2+} 供应来源与数量也是个问题。当然,Consonni 等^[57]已经利用数值模拟方法证实了意大利 Po 平原侏罗系古隆起发生压实驱动白云化作用的可行性,同时表明流体成分、渗透性和压实流体数量是压实驱动白云化作用的主要控制因素,而且经压实作用的盆地体积与古隆起体积

的比值也是白云化地质体最终大小的一个限制因素。不过,压实驱动模式还有很多细节问题没有引起更多关注,诸如流动通道的连续性和持续性、压实流体出现与持续的时间及其规模差异等等。对于压实驱动模式中流动通道的连续性和持续性的理解类似于对渗透回流模式中流体流动通道的理解,保持白云化流体流动通道的长时间畅通显然是任何一个白云化作用模式中水文循环机制所必须考虑的要害。同时,压实流体出现与持续的时间及其规模差异也是压实驱动模式应用时需要考虑的,包括压实流体的出现时间、持续时间、流量规模以及不同期次压实流体的时间、规模差异与沉积盆地演化之间的耦合关系等。

2.2 构造挤压模式

构造挤压模式是除压实驱动模式外的另一种由外力作用驱动地层流体流动而促使白云化作用发生的白云化作用模式(图2b),只不过该模式的流体驱动力不是重力负荷而是构造负荷。在构造挤压模式的水文流动体系中,一些富 Mg^{2+} 的地层流体因构造负荷作用产生的挤压变形从地层中排出,并被驱动到盆地边缘导致可渗透性灰岩发生白云化作用,被替换的 Ca^{2+} 进入到地下水中(表1);同时,这些流体往往与造山冲断带发育过程中向前陆盆地快速排驱的地层流体有关,且在前陆地带碳酸盐岩地层Pb—Zn成矿和油气聚集中充当主要角色^[58]。当然,这些与构造作用有关的流体也可以加入到压实驱动流体(见前面讨论)和地形驱动流体(见后面讨论)的流动中,并伴随多种流体的混合作用形成构造、压实或地形复合的驱动流体白云化作用^[59]。由于构造挤压模式应用的地质背景较为特殊,包括构造活跃的造山冲断带和前陆盆地等,因而其应用实例较少,如美国志留—泥盆系Helderberg群^[60]、美国阿巴拉契亚山脉南部一些推覆体中的奥陶系碳酸盐岩^[61]、加拿大西部泥盆系生物礁^[62]等。

如同其他埋藏白云化流体一样,盆地沉积物中因构造挤压产生的流体总体积仍然有限^[63],相关的模拟研究表明,构造挤压驱动体系中流体的通量很低且短暂^[64],随后的成岩研究也证实了这一点^[65],因而,构造挤压流体或与之相关的混合流体不可能形成大规模的交代白云岩。然而,热

的且流速较快的构造挤压流体可能会导致先前存在的具有较高孔隙度的白云岩发生重结晶作用,相应白云岩的结构和地球化学特征则反映了热重结晶作用的特征而不是原有白云化过程的特征,这往往容易使人们将这些经历了热重结晶作用的白云岩归入到构造挤压模式中,实际应用中需要注意区分^[8]。目前构造挤压模式仅仅是一个理想化的简单模型,实际情况并非我们以前想象的那么简单,复杂的构造背景是我们不得不首先面对的,构造运动活跃虽然可以形成地层流体流动的驱动力和通道,但也可以减弱原有流体驱动力和破坏原有流体流动通道,不同的机制可能会产生正面或负面截然不同的影响。同时,幕式发生的构造事件也会导致地层流体的幕式流动,其中构造挤压流体的主要出现时间、主要规模出现时间以及不同期次流体流动与构造运动之间的耦合关系等方面显得尤为重要。

2.3 地形补给模式

地形补给模式由Garven和Freeze^[50]首先提出,用以解释运动流体快速通过冲断带地形前面的前陆盆地,其穿过的距离可接近几百千米(图2c)。当沉积盆地抬升造山并在几十千米、甚至整个盆地尺度上暴露在大气水的补给环境下,就有可能发生地形补给驱动流^[63,66],高地势的地表大气水在水头压力等驱动力作用下穿越可渗透地层中的流动通道,最终到达地势较低的排泄区,类似于“水往低处流”。随着时间推移,地形可以驱动庞大数量的大气水通过沉积盆地,而且在大气水穿越沉积盆地可渗透地层时,不断发生的水—岩相互作用使得大气水中的矿化度逐渐增加,尤其是在穿越富盐类矿物地层过程中,并可通过含水层优先聚集^[59];其中一些富 Mg^{2+} 的高矿化度地层流体进入到可渗透性灰岩、并将其白云化,被替换的 Ca^{2+} 进入到地下水中(表1)。然而,要发生体积上有意义的白云化作用需要大气水在接触被白云化灰岩之前的流经路径中溶解足够的 Mg^{2+} ,但这并不常见。虽然有些地层受到了地形驱动流体的强烈影响,但也没有足够证据表明流动系统中有足够的 Mg^{2+} 可以实现区域白云化作用^[8],因而,目前还没有已证实通过地形补给模式发生广泛白云化作用的实例,但美国密苏里寒武

系碳酸盐岩^[67]、加拿大南部落基山脉寒武—奥陶系碳酸盐岩^[68]的白云化作用可能与地形补给白云化作用有关。

目前,地形补给模式只是一个理想化的简单模型,也存在类似于其他埋藏白云化作用模式的细节问题,包括高效的流动通道、充足的 Mg^{2+} 来源等。尽管地形补给模式是建立在有足够高度的正地貌背景下,以保证有足够的水头压力作为流体流动的驱动力,但这个“足够高度”比较笼统。具体多高的高度才是足够的;不同的渗透性地层作为通道时需要的“足够高度”的差异;哪个或哪几个时间的地形满足这个“足够高度”以及不同时间地形的流体流动通量差异。这些问题都是地形补给模式今后需要进一步完善的。同样,由于活跃的构造活动背景,地形补给模式中流体流动通道的改善、保持与破坏机制仍存有很多我们并不了解的地方。同时,尽管地形补给使流体流动和热再分布可以非常有效地穿越前陆盆地,但地表来源地下水的循环可以很快地清除沉积盆地的溶解物质,同时沉积盆地内含盐流体也会被席卷盆地的地表来源地下水所稀释,仅盆地的个别地方保留有含盐流体,那么如何实现充足的 Mg^{2+} 来源和适宜的盐度条件也是地形补给模式的主要问题。

2.4 热对流模式

与温度和盐度变化有关的浮力驱动着地下沉积物中的自由对流^[63]。热对流的原始驱动力源于温度在空间上的差异及其导致的孔隙流体密度和有效水头改变。地层温度的变化可能是以下原因造成:岩性控制下的热导率变化(如厚层蒸发岩覆盖下的碳酸盐岩^[25])、温暖台地海水与寒冷大洋海水之间的横向温度差异^[69]或者火成岩侵入体周边地区热通量的升高^[70],同时在多孔地层中对流发生所需的温度梯度强烈依赖于对流发生的潜在近水平地层的层厚、流体密度和地层倾角^[59]。依据对流系统与外围环境之间的热交换情况,热对流一般分为开放型、封闭型和混合型 3 种类型^[71],其中开放热对流单元主要形成于碳酸盐岩台地上,在顶部或侧向对海水开放,并使得海水可以补充或流出(图 2d),白云化作用所需的 Mg^{2+} 来源是富 Mg^{2+} 的海水,被替换的 Ca^{2+} 随循

环水回到广海(表 1);封闭热对流单元主要形成于封闭系统中,一般而言,当渗透性地层具有足够的温度梯度时,封闭热对流都可以发生在任何一个盆地超过几十米到几百米厚的地层中(图 2e),白云化作用所需的 Mg^{2+} 来源是富 Mg^{2+} 的地层流体,被替换的 Ca^{2+} 进入到地下水中(表 1);混合对流是热对流的一个变体,是在外部水力梯度驱动的流体流动与热对流单元存在相互作用的情况下发生^[71]。

在目前的实际应用中,热对流模式并不如地形补给模式或构造挤压模式流行,只有个别区域的地下白云岩成因解释使用了热卤水的深对流循环,而且往往与热液白云化作用联系在一起,如加拿大西北部地区 Manetoe 白云岩^[72]、加拿大安大略密歇根盆地奥陶系产气白云岩^[73]等,但有学者并不认为上述白云岩是热对流白云化作用的结果,因为,这些地区缺少任何与前白垩纪热异常有关的迹象^[74],同时,这些地区现今地形补给和构造挤压真实存在,而热对流并不是这些地区水文循环机制的主导作用力、甚至并不真实存在,因而,地形补给模式和构造挤压模式会在一定程度上比热对流模式优先获得考虑^[59];然而,近十余年来的白云化作用数值模拟研究表明,台地碳酸盐岩可以通过热对流模式实现大规模的白云化作用^[24-26],但热对流作用的形成并导致白云化作用的发生主要依赖于台地内部渗透性的分布、回流的存在与否,同时,白云石形成的数量受制于台地对海水循环的开放时间^[8]。由于热对流模式的数值模拟结果已经证明,在 $50\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (或 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 $500\sim 1\ 000\text{ m}$ (或 $2\ 000\text{ m}$)的温度和深度条件下,海水具备了发生广泛白云化作用的有利条件,因而,一些形成温度和深度与之类似的古代碳酸盐岩台地或生物礁白云岩被认为是海水开放热对流白云化作用的结果,如巴哈马新近系白云岩、加拿大阿尔伯达泥盆系白云岩、爱尔兰石炭系白云岩以及以色列白垩系 Soreq 组白云岩等^[8]。不过,由于缺乏研究实例,目前我们仍然很难估计热对流作用在区域—盆地水文循环机制中的真实意义,以下一些情况值得考虑:热对流作用主导区域—盆地尺度上的水文循环,并导致白云化作用发生的可行性;不同岩性、层厚、地层倾角、流体密度、构造样式等方面的组合对不同沉积盆地或者

同一盆地不同区域的水文热对流循环过程的差异影响;近地表补给区、流动通道的某个位置或邻近区域甚至地下深部提供充足的 Mg^{2+} 的可能性。

3 热液白云化作用模式

热液是比周围环境具有明显更高温度 ($>5^{\circ}C$ 或更多) 的流体^[75], 然而, 流体的温度并不是主要的, 流体与围岩的温度差是主要的。当然, 一些学者的定义要更严格: 热液的温度至少比环境温度高 $5\sim 10^{\circ}C$ 或者更高; 当流体与环境的温差在 $5\sim 10^{\circ}C$ 以内, 这些流体只是地热流体^[8,76]。如果热液作用携带了足够的 Mg^{2+} 穿越可渗透性灰岩, 那么就有可能发生白云化作用, 相应形成的白云岩被称为热液白云岩。一些几何形态更集中、形成于较高温度晕圈附近的白云岩更可能与热液白云化作用有关(图 2f)。这些热液白云岩更多地与相对可渗透通道有关, 诸如断层、逆冲推覆带或者通常与蒸发岩有关的不渗透盖层之下的区域^[2]。当深循环盆地流体通过可渗透通道向上运移到温度较低的较浅处时会变成热水、并产生局部矿化以及能够进行白云石的沉淀或交代^[77], 白云化作用所需的 Mg^{2+} 来源是富 Mg^{2+} 的地层流体, 被替换的 Ca^{2+} 进入到地下水中(表 1)。由于热液条件可以发生在包括从近地表到深埋藏的所有成岩背景类型的不同位置, 尤其是当断裂穿越了多个埋藏成岩带时, 因而, 热液白云化作用模式本质上并非是一种白云化作用模式^[8], 而更多地是一种综合的白云化环境。

目前, 国内热液白云化作用模式的兴起和流行主要是受到了 AAPG 在 2006 年 11 月出版的“Structurally Controlled Hydrothermal Alteration of Carbonate Reservoirs(构造控制下碳酸盐岩储层的热液改造)”专辑的影响, 该专辑主要涉及了热液白云岩成因及油气储层、热液硫化物矿床等方面的内容^[78]。当然, 也有学者认为“热液白云岩”这一术语是令人费解和没有意义的, 只是一个缺乏定义和想象力的产物^[76]。同时, 目前对热液白云岩的理解也存在较多误区, 例如: ①尽管在热液系统中白云石通常与贱金属矿物共生, 但这并不能成为所有与层控贱金属成矿作用有关的白云岩(白云石)是热液成因的证据; ②对于多

数认为是热液白云岩的实例而言, 并无可靠证据表明它们与热液成因或者热液叠加有关, 如在被认为经历了热液叠加的加拿大阿尔伯达泥盆系碳酸盐岩中也只有个别例子得以证实; ③鞍状白云石并非都是热液白云石, 它们可以形成于多种情况下, 只有一些情况下可能属于热液白云石, 如流体流动的热对流、热化学硫酸盐还原作用等^[8], 因而, 热液白云化作用模式的应用仍需慎重考虑。

目前热液白云化作用模式仍然不完善, 但也有些局部或区域尺度上的经典热液白云化实例, 如爱尔兰 Navan 的 Pb—Zn 矿化白云岩热柱^[79]、意大利阿尔卑斯 Latemar 建造的白云化热柱^[70]、阿尔伯达中西部深盆 Swan Hills Simonette 油田泥盆系的热液白云岩^[80]等。当然, 热液白云化作用模式中的较多问题仍有待进一步深化理解, 如热流体的驱动力、流体流动通道和 Mg^{2+} 的来源等。尽管由于热液本身就是具有热异常的流体, 它们可以通过热对流作用成为驱动力, 但这样的水文循环机制与我们前面介绍的热对流模式有所重合, 两者的流体都存在加热的过程, 而后进入相对冷的地层, 这两个模式之间可能存在实质性的差别, 不仅仅限于温度差的出现, 而存在的差异又可能导致显著不同的白云化过程。一般认为, 热液流动的可渗透通道往往与断层等断裂系统直接相关^[78], 如断裂系统发生热液白云化作用的唯一性、不同类型的断裂系统的热液白云化过程的差异性、其他构造系统发生热液白云化作用的可能性以及不同构造系统的热液白云化过程的可比性等。热液白云化作用模式中的 Mg^{2+} 来源也没有确切的说法, 尽管很多时候认为其来自深部地层, 但这些富 Mg^{2+} 热液可能来自碳酸盐岩、蒸发岩、碎屑岩, 也可能来自盆地基底岩石或者更深的地球内部, 同时, 不同来源的富 Mg^{2+} 热液的特征有着怎样的差异, 它们是否存在混合作用, 哪些来源的富 Mg^{2+} 热液是主体, 不同盆地或区域富 Mg^{2+} 热液的来源差异及其主要控制因素是什么等方面的问题都是我们需要考虑的。

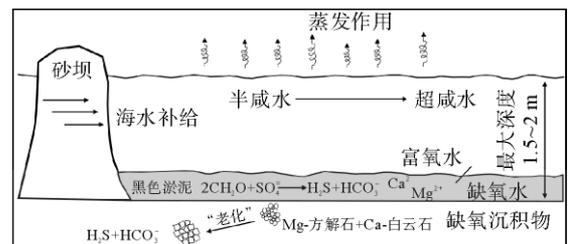
4 微生物白云化作用模式

近十余年来, 微生物白云化作用模式是新近提出、且在目前受到广泛关注的白云化作用模式。

由于在硫酸盐还原细菌参与的常温、常压条件下人工合成实验可以沉淀出十分有序的铁白云石^[81],因而,在某些厌氧微生物的媒介作用下(尤其是细菌硫酸盐还原作用),溶液离子可以克服动力学屏障而形成真正白云石的晶核,这是人们在常温、常压条件下人工合成实验中第 1 次获得真正意义上的白云石。其后,在巴西 Rio de Janeiro 地区 Lagoa Vermelha 潟湖地表中发现白云石可以沉淀在常温环境下黑色富含有机质的沉积物中^[82],即在地表条件下,通过细菌硫酸盐还原作用(TSR)可以从自然环境中直接沉淀出具超结构的白云石(图 3)。微生物白云化作用模式与前期的有机白云化作用模式^[83]在原理上一致,只是微生物白云化作用模式更强调微生物新陈代谢活动在白云石沉淀过程中的主导作用,白云化作用所需的 Mg^{2+} 来源是富 Mg^{2+} 的海水,被替换的 Ca^{2+} 进入到孔隙水中(表 1)。在微生物参与的硫酸盐还原、甲烷形成、甲烷厌氧氧化、有氧呼吸过程中,硫酸盐还原细菌、产甲烷细菌、喜盐性需氧细菌分别在无氧或有氧条件下营造了一个适合白云石沉淀的微环境^[84,85],这些沉淀白云石更多的是微生物生命活动的副产品。

显生宙以来白云石的丰度和分布与地球生物化学旋回之间可能存在关联,白云化作用广泛发育时期与大气圈和海洋的低含氧量时期相对应,低含氧量有利于厌氧微生物(包括硫酸盐还原细菌)群落的活动,从而在很大程度上促进了海相碳酸盐广泛白云化作用的进行^[86]。当然,微生物白云化作用模式是否可以用于解释古代分布广泛的层状白云岩的成因问题仍然有待进一步深入研究。微生物的大量活跃往往与有机质富集密切相关^[82,85],但大量交代白云岩的先驱岩石都是来自于高能富氧环境的产物,如浅滩、生物礁等,这些环境缺少大量厌氧微生物繁殖生活的必需条件——缺氧或少氧、富有机质,较少的厌氧微生物活动很难进行如此大规模的白云化作用。同时,微生物白云化作用一般是发生在无氧或少氧的封闭系统中,但封闭系统中封存的海源孔隙流体只可以提供少部分 Mg^{2+} 来源(海水中 Mg^{2+} 含量仅为 1.272%^[87]),如何解决大规模层状白云岩形成时所需要的大量 Mg^{2+} ? 在半深海—深海环境中,准同生白云石(往往更可能与微生物白云化作用

有关)的质量分数通常不到 1%^[8],这也说明有限的 Mg^{2+} 来源是微生物白云化作用模式应用的重要制约因素。目前,在微生物白云化过程中,白云石的形成方式通常以原生沉淀为主,很少以交代其他类型碳酸盐矿物的方式出现,但我们在很多古代大规模层状白云岩中仍然可以见到较清晰或模糊的交代残余结构,如果古代大规模层状白云岩是微生物白云化的结果,那么微生物在交代过程中充当的角色以及这个过程的实现机理和控制因素都是我们所关心的。



注:图中阴影部分为白云石可能形成区域

图 3 微生物白云化作用模式(据文献^[86])

Fig. 3 Schematic diagram of Microbial dolomitization model (after reference ^[86])

5 结语

目前,人们对“白云石问题”的理解是建立在 20 世纪 50 年代以来广泛的现代和古代碳酸盐沉积地质调查基础上,但这些理解仍然十分有限。不同碳酸盐白云化作用模式的相继建立和应用并未使人们对“白云石问题”的争论逐渐平息,而是越发激烈。事实上,白云石是一种成分结构简单的矿物,但并不是一种成因来源简单的矿物,仅用几个富有理想主义色彩的白云化作用模式很难包办自然界中不同地区、不同时间白云石(白云岩)的成因解释;尤其是当人们忽视了不同碳酸盐白云化作用模式的真实性和适用性等核心问题时,碳酸盐白云化作用模式就更有可能陷入被滥用的境地。在实际应用中,人们需要在大量第一手资料分析总结的基础上,根据区域地质背景、白云化流体性质、白云化流体来源、水文循环机制等实际情况辩证地应用目前已有的碳酸盐白云化作用模式,只有这样的成因解释才能更好地符合每一类

白云石(白云岩)的特殊成因。

碳酸盐白云化作用及白云岩成因始终是地质学领域尚未解决的难题,目前对“白云石问题”依然知之甚少、某些问题甚至一无所知,但人们一直也没有停止对其进行研究和探讨。经过了近几十年的积累和总结,人们对于上述不同碳酸盐白云化作用模式已经有了不同声音:萨布哈模式和渗透回流模式受到了普遍认同;混合水模式受到了持续挑战;压实驱动模式、构造挤压模式、地形补给模式、热对流模式等中—深埋藏白云化作用模式和热液白云化作用模式受到了广泛关注;微生物白云化作用模式正逐渐兴起。但是,不同碳酸盐白云化作用模式对应的白云化环境和过程不尽相同、甚至差异悬殊,不同碳酸盐白云化作用模式也都有类似或者不同的缺点和不足,如何改进现有的或者总结全新的模式以更符合自然界中真实的白云化作用过程仍然是白云岩研究领域的核心命题。新技术、新方法的应用以及地质学、地球化学、水文学、地球物理学、微生物学等多学科的综合,必将在更大程度上推动碳酸盐白云化作用及白云岩成因研究。

参考文献:

- [1] Dolomieu D G de. Sur un genre de pierres calcaires très peu effervescentes avec les acides et phosphorescentes par la collision[J]. *Journal de Physique*, 1791, 39: 3-10.
- [2] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52: 1-81.
- [3] Alderman A R, Skinner H C W. Dolomite sedimentation in the south-east of South Australia [J]. *American Journal of Science*, 1957, 255: 561-567.
- [4] Von Der Borch C C. Stratigraphy and formation of Holocene dolomitic carbonate deposits of the Coorong Area, South Australia [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1976, 46: 952-966.
- [5] Botz R W, Von der Borch C C. Stable isotope study of carbonate sediments from the Coorong Area, South Australia [J]. *Sedimentology*, 1984, 31: 837-849.
- [6] Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L. Concepts and models of dolomitization [M]. Tulsa; SEPM Special Publications 28, 1980:1-328.
- [7] Warren J K. *Evaporites: their evolution and economics* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1999: 1-438.
- [8] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal [M]//Braithwaite C J R, Rizzi G, Darke G. *The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs*. London: Geological Society of London Special Publication 235, 2004:7-63.
- [9] 王 勇.“白云岩问题”与“前寒武纪之谜”研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(8): 857-862.
- [10] 张学丰, 胡文璋, 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, 25(5): 32-40.
- [11] 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, 46(6): 1 010-1 020.
- [12] Wood W W, Sandford W E, Habshi A R S A. Source of solutes to the coastal sabkha of Abu Dhabi [J]. *GSA Bulletin*, 2002, 114: 259-268.
- [13] Wenk H R, Hu M, Frisia S. Partially disordered dolomite: microstructural characterization Abu Dhabi sabkha carbonates [J]. *American Mineralogist*, 1993(718): 769-774.
- [14] Friedman G M, Sanders J E. Origin and occurrence of dolostones [M]//Chilingar G V, Bissell H J, Fairbridge R W. *Carbonate rocks: origin, occurrence, and classification*. Amsterdam: Elsevier, 1967:267-348.
- [15] Kinsman D J J. Modes of formation, sedimentary associations, and diagnostic features of shallow-water and supratidal evaporates [J]. *AAGP Bulletin*, 1969, 53: 830-838.
- [16] Hsü K J, Schneider J. Progress report on dolomitization-hydrology of Abu Dhabi Sabkhas, Arabian Gulf [M]//Purser B H. *The Persian Gulf*. New York: Springer, 1973:409-422.
- [17] Müller D W, McKenzie J A, Mueller P A. Abu Dhabi sabkha, Persian Gulf, revisited: application of strontium isotopes to test an early dolomitization model [J]. *Geology*, 1990, 18: 618-621.
- [18] McKenzie J A, Hsü K J, Schneider I F. Movement of subsurface waters under the sabkha, Abu Dhabi, UAE, and its relation to evaporative dolomite genesis [C]//Zenger D H, Dunham I B, Ethington R L. *Concepts and models of dolomitization*. Tulsa ;SEPM Special Publications 28, 1980:11-30.
- [19] Sadooni F N, Howari F, El-Saiy A. Microbial dolomites from carbonate-evaporite sediments of the coastal sabkha of Abu Dhabi and their exploration implications [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2010, 33: 289-298.
- [20] Bontognali T R R, Vasconcelos C, Warthmann R J, et al. Dolomite formation within microbial mats in the coastal sabkha of Abu Dhabi (United Arab Emirates) [J]. *Sedimentology*, 2010, 57: 824-844.
- [21] Adams J F, Rhodes M L. Dolomitization by seepage re-

- fluxion [J]. AAPG Bulletin, 1960, 44: 1 912-1 920.
- [22] Shields M J, Brady P V. Mass balance and fluid flow constraints on regional-scale dolomitization, Late Devonian, Western Canada Sedimentary Basin [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1995, 43: 371-392.
- [23] Potma K, Weissenberger J A W, Wong P K, et al. Toward a sequence stratigraphic framework for the Frasnian of the Western Canada Basin [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2001, 49: 37-85.
- [24] Jones G D, Smart P L, Whitaker F F, et al. Numerical modeling of reflux dolomitization in the Grosmont platform complex (Upper Devonian), Western Canada Sedimentary Basin [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87: 1 273-1 298.
- [25] Jones G D, Whitaker F F, Smart P L, et al. Numerical analysis of seawater circulation in carbonate platforms; II. The dynamic interaction between geothermal and brine reflux circulation [J]. American Journal of Science, 2004, 304: 250-284.
- [26] Whitaker F F, Smart P L, Jones G D. Dolomitization; from conceptual to numerical models[M]//Braithwaite C J R, Rizzi G, Darke G. The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs. London: Geological Society of London Special Publication 235, 2004:99-139.
- [27] Müller S, Teitz G. Dolomite replacing "cement A" in biocalcarenes from Fuerteventura, Canary Islands, Spain [M]//Bricker D P. Carbonate Cements. Baltimore: John Hopkins Press, 1971:376.
- [28] Kocurko M J. Dolomitization by spray-zone brine seepage, San Andres, Colombia [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1979, 49: 209-214.
- [29] Aharon P, Kolodny Y, Sass E. Recent hot brine dolomitization in the "Solar Lake", Gulf of Elat: isotopic, chemical, and mineralogical study [J]. Journal of Geology, 1977, 85: 27-48.
- [30] Warren J K. Sulfate dominated sea-marginal and platform evaporative settings [M]//Melvin J L. Evaporites, Petroleum and Mineral Resources. Amsterdam: Elsevier, Development in Sedimentology 50, 1991:477-533.
- [31] Deffeyes K S, Lucia F J, Weyl P K. Dolomitization of recent and Plio-Pleistocene sediments by marine evaporite waters on Bonaire, Netherlands Antilles [C]//Pray L C, Murray R C. Dolomitization and Limestone Diagenesis. SEPM Special Publication 13, 1965:71-88.
- [32] Lucia F J. Recent sediments and diagenesis of south Bonaire, Netherlands Antilles [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1968, 38: 845-858.
- [33] Murray R C. Hydrology of South Bonaire, Netherlands Antilles: a rock selective dolomitization model [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1969, 39: 1 007-1 013.
- [34] Fouke B W, Beets C J, Meyers W J, et al. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr chronostratigraphy and dolomitization history of the Seroe Domi Formation, Curacao Netherlands Antilles [J]. Facies, 1996, 35: 293-320.
- [35] Machel H G., Mountjoy E W, Amthor J E. Mass balance and fluid flow constraints on regional-scale dolomitization, Late Devonian, Western Canada Sedimentary Basin [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 566-571.
- [36] Friedman G M. Dolomite is an evaporite mineral: evidence from the rock record and from sea-marginal ponds of the Red Sea [C]//Zenger D H, Dunham I B, Ethington R L. Concepts and Models of Dolomitization. Tulsa: SEPM Special Publications 28, 1980:69-80.
- [37] Hanshaw B B, Back W, Deike R G. A geochemical hypothesis for dolomitization by ground water [J]. Economic Geology, 1971, 66: 710-724.
- [38] Land L S. Contemporaneous dolomitization of middle Pleistocene reefs meteoric water, North Jamaica [J]. Bulletin of Marine Science, 1973, 23: 64-92.
- [39] Badiozamani K. The Dorag dolomitization model: application to the Middle Ordovician of Wisconsin [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1973, 43: 965-984.
- [40] Hardie L A. Dolomitization; a critical view of some current views [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1987, 57: 166-183.
- [41] Machel H G, Burton E A. Golden Grove Dolomite, Barbados: Origin from modified seawater [J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64: 741-751.
- [42] Land L S. Dolomitization of the Hope Gate Formation North Jamaica by seawater: reassessment of mixing zone dolomite [C]//Taylor H P, O'Neil J R, Kaplan I R. Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. Geochemical Society Special Publication 3, 1991:121-133.
- [43] Melim L A, Swart P K, Eberli G P. Mixing-zone diagenesis in the subsurface of Florida and the Bahamas [J]. Journal of Sedimentary Research, 2004, 74: 904-913.
- [44] Luczaj J A. Evidence against the Dorag (mixing-zone) model for dolomitization along the Wisconsin arch: a case for hydrothermal diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90: 1 719-1 738.
- [45] Müller G. Diagenesis in argillaceous sediments [M]//Larsen G, Chilingar G V. Diagenesis in Sediments. Amsterdam: Elsevier, Developments in Sedimentology 8, 1967:127-177.
- [46] Galloway W E, Hobday D K. Terrigenous clastic depositional Systems: applications to petroleum, coal, and uranium exploration [M]. New York: Springer, 1983:1-423.
- [47] Machel H G. Effects of groundwater flow on mineral diagenesis, with emphasis on carbonate aquifers [J]. Hydro-

- geology Journal, 1999, 7: 94-107.
- [48] Machel H G. Investigations of burial diagenesis in carbonate hydrocarbon reservoir rocks [J]. *Geoscience Canada*, 2005, 32: 103-128.
- [49] Illing L V. Deposition and diagenesis of some upper Paleozoic carbonate sediments in Western Canada [C]//Proceedings of the Fifth World Petroleum Congress, Section 1, New York, 1959: 23-52.
- [50] Garven G, Freeze R A. Theoretical analysis of the role of groundwater flow in the genesis of stratabound ore deposits 2: Quantitative results [J]. *American Journal of Science*, 1984, 284: 1 125-1 156.
- [51] Jodry R L. Growth and dolomitization of Silurian Reefs, St. Clair County, Michigan [J]. *AAPG Bulletin*, 1969, 53: 957-981.
- [52] Machel H G, Anderson J H. Pervasive subsurface dolomitization of the Nisku Formation in central Alberta [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59: 891-911.
- [53] Mountjoy E W, Machel H G, Green D, et al. Devonian matrix dolomites and deep burial carbonate cements: a comparison between the Rimbey-Meadowbrook reef trend and the deep basin of west-central Alberta [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1999, 47: 487-509.
- [54] Magara K. *Compaction and Fluid Migration: Practical Petroleum Geology* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1978: 1-319.
- [55] Morrow D W. Diagenesis 2. Dolomite -Part 2: Dolomitization models and ancient dolostones [J]. *Geoscience Canada*, 1982, 9: 95-107.
- [56] Given R K, Wilkinson B H. Dolomite abundance and stratigraphic age: constrains on rates and mechanisms of Phanerozoic dolostone formation [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57: 1 068-1 078.
- [57] Consonni A, Ronchi P, Geloni C, et al. Application of numerical modelling to a case of compaction-driven dolomitization: A Jurassic palaeohigh in the Po plain, Italy [J]. *Sedimentology*, 2010, 57: 209-231.
- [58] Oliver J. Fluids expelled tectonically from orogenic belts; their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena [J]. *Geology*, 1986, 14: 99-102.
- [59] Morrow D W. Regional subsurface dolomitization: models and constraints [J]. *Geoscience Canada*, 1998, 25: 57-70.
- [60] Dorobek S. Migration of orogenic fluids through the Siluro-Devonian Helderberg Group during late Paleozoic deformation: constraints on fluid sources and implications for thermal histories of sedimentary basins [J]. *Tectonophysics*, 1989, 159: 25-45.
- [61] Montanez I P. Late diagenetic dolomitization of Lower Ordovician, Upper Know carbonates: a record of hydrodynamic evolution of the southern Appalachian Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78: 1 210-1 239.
- [62] Drivet E, Mountjoy E W. Dolomitization of the Leduc Formation (Upper Devonian), southern Rimbey-Meadowbrook reef trends, Alberta [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67: 411-423.
- [63] Garven G. Continental-scale groundwater flow and geological processes [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1995, 23: 89-117.
- [64] Deming D, Nunn J A, Evans D G. Thermal effects of compaction-driven groundwater flow from overthrust belts [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95 (B5): 6 669-6 683.
- [65] Buschkuehle B E, Machel H G. Diagenesis and paleofluid flow in the Devonian Southesk-Cairn carbonate complex in Alberta, Canada [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19: 219-227.
- [66] Toth J. *Groundwater and hydrocarbon migration* [M]//Back W, Rosenhein J S, Saebel P R. *Hydrogeology. The geology of North America*, 0-2. Boulder: Geological Society of America, 1988: 485-502.
- [67] Gregg J M. Regional epigenetic dolomitization in the Bonnetterre dolomite (Cambrian), southeastern Missouri [J]. *Geology*, 1985, 13: 503-506.
- [68] Yao Q, Demicco R V. Paleoflow patterns of dolomitizing fluids and paleohydrogeology of the southern Canadian Rockies Mountains: evidence from dolomite geometry and numerical modeling [J]. *Geology*, 1995, 23: 791-794.
- [69] Kohout F A, Henry H R, Banks J E. Hydrogeology related to geothermal conditions of the Floridan Plateau [M]//Smith K L, Griffin G M. *The Geothermal Nature of the Floridan Plateau*. Florida: Department of Natural Resources Bureau, *Geology Special Publications* 21, 1977: 1-34.
- [70] Wilson E N, Hardie L A, Philips O M. Dolomitization from geometry, flow patterns, and the origin of massive dolomite: the Triassic Latemar buildup, northern Italy [J]. *American Journal of Science*, 1990, 290: 741-796.
- [71] Raffenberger J P, Vlassopoulos D. The potential for free and mixed convection in sedimentary basins [J]. *Journal of Hydrogeology*, 1999, 1: 505-520.
- [72] Morrow D W, Cumming G L, Aulstead K L. The Gas-Bearing Devonian Manetoe Facies, Yukon, and Northwest Territories [J]. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 1990, 400: 1-54.
- [73] Coniglio M, Sherlock R, Williams-Jones A E, et al. Burial and hydrothermal diagenesis of Ordovician carbonate from the Michigan Basin, Ontario, Canada [M]//Purser B H, Tucker M E, Zenger D H. *Dolomites: A volume in honour of dolomieu*. IAS Special Publication 21, 1994:

- 231-254.
- [74] 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: 164-185.
- [75] White D E. Thermal waters of volcanic origin [J]. *GSA Bulletin*, 1957, 68: 1 637-1 658.
- [76] Machel H G, Lonnee J. Hydrothermal dolomite—a product of poor definition and imagination [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 163-171.
- [77] Hardie L A. On the significance of evaporates [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1991, 19: 131-168.
- [78] Davies G R, Smith J L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies; an overview [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90: 1 641-1 690.
- [79] Braithwaite C J R, Rizzi G. The geometry and petrogenesis of hydrothermal dolomite at Navan, Ireland [J]. *Sedimentology*, 1997, 44: 421-440.
- [80] Duggan J P, Mountjoy E W, Stasiuk L D. Fault-controlled dolomitization at Swan Hills Simonette oil field (Devonian), deep basin west-central Alberta, Canada [J]. *Sedimentology*, 2001, 48: 301-323.
- [81] 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: 220-222.
- [82] 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 Sedimentary Research*, 1997, 67: 378-390.
- [83] Compton J S. Degree of supersaturation and precipitation of organogenic dolomite [J]. *Geology*, 1988, 16: 318-321.
- [84] Kenward P A, Goldstein R H, González L A, et al. Precipitation of low-temperature dolomite from an anaerobic microbial consortium; The role of methanogenic Archaea [J]. *Geobiology*, 2009, 7: 556-565.
- [85] 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, 12(6): 699-710.
- [86] Burns S J, McKenzie J A, Vasconcelos C. Dolomite formation and biogeochemical cycles in the Phanerozoic [J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (Supp II): 49-61.
- [87] Mason B. *Principles of geochemistry* [M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons Inc., 1966:1-329.

A REVIEW OF DOLOMITIZATION MODELS OF CARBONATES

HU Zuwei, HUANG Sijing, ZHANG Chao, LANG Xianguo, ZHOU Hua

(State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation, Institute of Sedimentary Geology,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Dolomitization of carbonates, an important process in nature, has remained as a controversy in sedimentology for years. To thoroughly understand the progress of the study of dolomitization is a necessity to improving existing models and creating new models. Based on the review of references, this paper made a summarization of the current dolomitization models, such as near-surface (shallow buried) dolomitization models (Sabkha model, seepage reflux model, mixing zone or Dorag model), the intermediate-deeply buried dolomitization models (compaction model, tectonic (squeegee) model, topography driven model, thermal convection model), hydrothermal model and microbial model, with emphasis on the present status and problems of each model.

Key words: carbonate; dolomite; dolomitization; diagenesis