

白云石成因模式的研究进展及其适用性探讨

王茂林¹, 周进高^{2,3}, 陈冬霞^{1,4}, 郝毅², 彭辉界¹
汪超¹, 蒋玉婷⁵, 谢明贤¹

(1 中国石油大学(北京)地球科学学院; 2 中国石油杭州地质研究院; 3 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)
(4 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室; 5 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院)

摘要 在分析大量国内外文献资料的基础上, 将现有的 20 余种白云石的成因划分为原生白云石和次生白云石化两类模式, 根据镁钙比等指标又将次生白云石化模式进一步细分为高镁钙比、低镁钙比、正常镁钙比白云石化及其它白云石化 4 种模式类型, 并对其中几种经典的白云石化模式的真实性和适用性进行了探讨。认为蒸发泵白云石化模式和回流渗透白云石化模式受到了普遍认可; 混合水白云石化模式遭受到持续挑战; 海水白云石化模式和埋藏白云石化模式得到了广泛关注; 热液白云石化模式和微生物白云石化模式逐渐成为新的主流模式。

关键词 白云石; 白云石化作用; 成因模式; 研究进展; 评述

中图分类号: TE112.23 **文献标识码:** A

白云石, 自法国博物学家 Dolomieu 于 1791 年首次描述以来^[1], 一直备受关注, 原因有二:

一是为了满足油气和一些低温热液金属矿产(如 MVT 型铅锌矿床和很多矽卡岩矿床)勘探的需要。白云岩是一种重要的储集层, 就世界范围看, 高达 50% 的碳酸盐岩储层是白云岩, 北美碳酸盐岩中的油气 80% 以上储集在白云岩中^[2], 俄罗斯、西北欧、北非、南非、西非、中东以及远东地区都有大量的白云岩储层, 在中国四川盆地^[3]、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地^[4]也均发现了大量的白云岩油气储层。

二是为了满足理论研究的需要。白云石的形成机理是碳酸盐岩石学中最复杂、争论时间最久而又最难以解决的问题之一。白云石是岩石中一种常见的碳酸盐矿物, 它广泛分布在古代碳酸盐台地中, 却很少分布在全新世沉积物中, 这对“将今论古”原理是一个极大挑战。现代海水对白云石过饱和, 但却很少有白云石沉淀, 即便在实验设备如此先进的当代, 地表温度下如果没有微生物细

菌的媒介作用参与, 实验室几乎不可能人工合成出真正意义上的白云石^[5], 人们不能通过简单的室内化学反应来解决白云石成因问题。正是由于白云石成因的理论研究远远不能满足现实生产实际的需求, 故进一步探讨白云石成因问题才具有非常重要的理论和现实意义。

自 20 世纪 60 年代首次提出白云石成因机理以来, 以大量的古代和现代白云岩的实例研究和实验分析技术的进步作为讨论白云石成因模式的基础, 直到今天, 在不同的研究阶段陆续有人提出了 20 余种白云石化模式(表 1)^[6-28]。第一个阶段, 主要是发现阶段, 应用物理化学原理提出相应的模式来解释所观察到的现象; 第二个阶段是在现代沉积中发现了白云石, 提出了新的思想和模式。这些模式对认识和研究白云石的成因提供了一定科学依据, 然而这些模式都或多或少地存在一定的局限性, 甚至被质疑。因而, 本文在对现有白云石成因模式进行分析、讨论、归类的同时, 将着重探讨不同白云石成因模式的真实性和适用性等核心问题。

收稿日期: 2012-09-03; 改回日期: 2012-12-06

本文受国家科技攻关项目“四川、塔里木等盆地及邻区海相碳酸盐岩大油气田形成条件、关键技术及目标评价”(编号: 2008ZX0504-003)资助
王茂林: 1988 年生, 现为中国石油大学(北京)在读硕士研究生, 专业为地质工程。通讯地址: 102249 北京市昌平区府学路 18 号

表1 白云石成因模式分类

模式分类	先驱者 (发表年)	应用地区	应用条件	Mg ²⁺ /Ca ²⁺ 来源	Ca ²⁺ /Mg ²⁺ 流向	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	流体运输机制	成因机理
原生白云石模式	Alderman 等 ^[6] (1957)	澳大利亚南部考龙地区	水很深, pH值很高, 植物茂盛的潟湖环境	海水				以化学沉淀方式直接从水体中沉淀的白云石
	方少仙等 ^[7] (2003)	四川盆地	黑色非叠层石生态系蓝细菌发育	海水				蓝细菌作用下在沉积期形成的白云石
高镁钙比白云石化模式	Adams 等 ^[8] (1960)	美国德克萨斯西部地区	气候干旱, 相对封闭的蒸发环境, 高渗透性地台沉积物	海水	海水	10~30	风暴灌注, 蒸发泵, 密度流	向下回流渗透的高镁水交代穿过的碳酸盐沉积物或石灰岩发生白云石化
	Hsu 等 ^[9] (1969)	波斯湾萨右哈地区	气候干旱, 强烈蒸发作用的高盐度条件	海水或大陆卤水	孔隙水	10~30	蒸发泵吸, 风暴灌注, 潮汐流	湖上带的高镁回盐水或表层水交代石灰岩发生白云石化
低镁钙比白云石化模式	Goodell 等 ^[10] (1969)	巴哈马安德罗斯岛	地壳上升, 海平面相对下降的条件	沉积物本身	海水	1.2~3.6	密度流	大气水影响下使碳酸盐沉积物发生溶解和交代作用, 在化学成分及矿物成分上进行重新组合或调整, 使原来的碳酸盐沉积物发生白云石化作用
	Badrizamanji ^[11] (1973)	美国威斯康星地区	陆表海陆棚或发育在正向单元的混合带中	海水	海水	1.2~3.6	潮汐泵	海水含量为10%~40%的混合液, 对白云石过饱和, 对方解石却不饱和, 对白云石沉淀有利
正常镁钙比白云石化模式	郑荣才等 ^[12] (1992)	广西崇左江洲地区	陆表海陆棚或发育在正向单元的混合带中	海水	海水	1.2~3.6	潮汐泵	混合水带形成的无序白云石在偏向淡水潜流带的端元重结晶形成有序白云石
	Carballo 等 ^[13] (1987)	佛罗里达岛链 Sugarlof 岛	活跃的潮汐泵吸作用, 沉积物具有合适的渗透率	海水	海水	5.2~10	潮汐泵	潮汐泵使大量海水集中通过只有合适渗透率的沉积物发生白云石化
其他白云石化模式	Saller 等 ^[14] (1984)	太平洋 Enciwatak 环礁带	海水泵吸, 热循环作用强烈, 沉积物具有合适的渗透率	海水	海水	5.2~10	海水泵吸及向上的热对流	海水泵吸使大量海水集中通过只有合适渗透率的沉积物发生白云石化
	Mullins 等 ^[15] (1985)	巴哈马台地边缘地区	热对流活跃, 沉积物具有合适的渗透率	海水	海水	5.2~10	地热形成的大规模对流系统	地热的对流, 使大量海水集中通过具有合适渗透率的沉积物发生白云石化
其他白云石化模式	Illing 等 ^[16] (1959)	加拿大西部地区	地层较深, 温度, 压力较高, 石灰岩具有一定的孔隙度和渗透率	黏土矿物、深部高温热液及高镁方解石	地下水	4~10	深海沉积的泥岩压实作用	高温下压实作用使 Mg ²⁺ 运移到石灰岩中从而致白云石化
	Zdzislaw ^[17] (1959)	波兰圣十字山地区	地壳深大断裂周缘活动	深部热液流体及萃取的围岩镁离子	海水		构造运动及深部热液循环	地热流体沿着地壳深大断裂带上升, 在交代围岩中萃取镁离子。这些组分与海水混合后在硫化细菌作用下, 多次脉动循环形成白云石 ^[17-18]

表 1 (续表)

模式分类	先驱者 (发表年)	应用地区	应用条件	Mg ²⁺ 来源	Ca ²⁺ 流向	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	流体运输机制	成因机理
次生白云石化模式	王国忠等 ^[9] (1984)	海南岛 排浦地区	热带海岸潮间带的耐盐性植物	海水	孔隙水	2.3~4.1	压实驱动、薄膜的蒸腾作用	植物强烈的蒸腾作用使得粒间水被浓缩,水温、盐度、Mg ²⁺ /Ca ²⁺ 和 pH 值升高,有利于白云石的沉淀 ^[9,20]
	Garven 等 ^[1] (1984)	美国 密苏里地区	沉积盆地抬升造山并在几千米、甚至整个盆地尺度上暴露在大气的补给环境中	大气水及其溶解围岩的镁离子	地下水		水头压力	地形驱动庞大量的大气水穿越沉积盆地可渗透地层时,不断发生的岩石作用使得大气水中的矿化度逐渐增加。其中一些富 Mg ²⁺ 离子的高矿化度流体进入到可渗透性灰岩,并将其白云石化
	Anderson 等 ^[2] (1987)	美国 怀俄明、 密西西比地区	区域构造运动,深大断裂带发育,且灰岩上部覆盖致密碎屑岩	深部热液流体	地下水	4~10	区域构造运动、地壳异常以及放射性热源	富 Mg ²⁺ 的构造热液流经上覆灰岩地层,并对其进行白云石化改造
	Cervato 等 ^[23] (1990)	阿尔卑斯南段 占特提斯海地区	火山活动,伴有区域构造运动的发生	火山热液及火山物质的蚀变产物	地下水及 火山热液	4~10	火山活动及其导致的构造运动	富 Mg ²⁺ 的火山热液流经上覆灰岩地层,并对其进行白云石化改造
	Mounjoy 等 ^[24] (1991)	美国 阿巴拉契亚 南部地区	变质作用强烈,产生大量的变质热液	变质热液及遭受变质岩石	地下水	4~10	区域驱动流或地层深部热液对流	在变质作用引起的富 Mg ²⁺ 的热液流经上覆灰岩地层,并对其进行白云石化改造
	郭金华等 ^[25] (1992)	鄂尔多斯盆地、 河北唐山地区	压力增高的富镁条件下出溶	Mg 方解石	海水		压力驱动	沉淀镁方解石重结晶后在压力增加的条件下经出溶作用形成白云石
	Viscoendes 等 ^[26] (1997)	巴西 Lagoa Vermelha 地区	超盐度盐碱滩中嗜硫细菌发育	富镁离子的海水	孔隙水	0.7~6.0	密度流	微生物的新陈代谢利用 SO ₄ ²⁻ 克服动力学障碍,释放出 Mg ²⁺ ,为白云石的沉淀提供了条件
	Momow 等 ^[27] (1998)	美国 Helderberg 群	活跃的构造运动及与地层流体流动具有良好的耦合关系	地层流体	地下水		构造负荷产生的地形排驱	富 Mg ²⁺ 离子的地层流体因为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石化作用
	金振奎等 ^[28] (1999)	滇东—川西地区	上部发育巨厚玄武岩	玄武岩中镁矿物的风化分解	孔隙水		上覆玄武岩形成高大山脉造成的高水头压力	富含铁镁的玄武岩遭受淡水淋滤后释放出镁离子从而使下伏的石灰岩白云石化

1 白云石成因模式

通过对古代和现代白云石的研究,目前人们已经积累了大量矿物学、岩石学、矿床学、沉积学和地球化学等领域的基础资料,除了直接沉淀的原生白云石外,还总结了一系列不同类型的白云石化模式来解释白云石的成因问题。各种各样的白云石化模式分别体现了与不同环境、不同层位相对应的白云石的形成机制,因而某一白云石化作用模式本身具有先天的特殊性,并导致了其多样性。不同白云石化作用模式的分类方式也是多种多样,比如以可能发生的深度、 Mg^{2+} 来源、发生时间等角度进行分类。

本文根据不同白云石化模式的 Mg^{2+}/Ca^{2+} 值对目前的次生白云石化模式进行分类,具体可分为高镁钙比白云石化模式、低镁钙比白云石化模式、正常镁钙比白云石化模式及其它模式等四种类型(表1)。根据赫云兰等^[29]的统计结果,本文将高镁钙比白云石化模式的 Mg^{2+}/Ca^{2+} 值划为10~30,低镁钙比白云石化模式的 Mg^{2+}/Ca^{2+} 值划为1.2~3.6,正常镁钙比白云石化模式的 Mg^{2+}/Ca^{2+} 值划为5.2~10。

1.1 原生白云石模式

“原生白云石”通常指以化学沉淀方式从水体中直接沉淀出可化学计量的白云石或以胶结物形式沉淀在大孔隙中的白云石^[30]。近几十年来,在已经发现的近代白云石的实例中,最“过硬”的原生白云石的实例,应属澳大利亚南部考龙湖和美国加利福尼亚深泉湖中的白云石^[30],近年也有学者把“非叠层生生态系蓝细菌白云石”视为原生白云石^[7]。这些原生白云石一般是全新世的产物,其晶体洁净透明,为自形的细晶或微晶,以原生孔隙或溶蚀孔隙中充填胶结物的形式产出,或与文石、高镁方解石共生。

从理论上讲,直接化学沉淀的原生白云石应该是存在的,但是,不具有普遍意义。到目前为止,还没有找到一个较好的实例来证明这种具有地层学意义的原生白云石的确存在。目前在常温常压的实验室条件下,在无微生物细菌的参与下尚未合成出真正可化学计量的白云石。在硫酸盐还原细菌作用下形成的那些白云石是在生物参与下形成的,更多体现的是生物的特性。所以,是否真正有以化学沉淀的方式从水体中直接沉淀出来的白云石,这一问题仍将继续讨论下去。

1.2 次生白云石化模式

各种次生白云石化作用机理的实例远比原生白云石的多,其可信程度也远比原生白云石的实例高。各种交代成因的白云石化模式所对应的适用条件、 Mg^{2+} 来源、 Ca^{2+} 流向、流体运输机制以及形成机理等问题已在表1中列出,典型的次生白云石化模式如图1所示。

2 几种白云石化模式的研究进展及适用性探讨

20世纪60年代国外首次提出白云石成因机理至今,上述20余种白云石成因模式的相继建立与应用,不仅没有成功解释“白云石问题”,反而使得相应的白云石成因模式受到不断的挑战和质疑。事实上,不同地区的白云石因其形成环境和条件不同而相差较大,即使在同一地区也因环境的不断演化而有所变化。正是因为这种白云岩产出特征的多样性和地质分布的不均一性,包括回流渗透白云石化模式等在内的所有白云石成因模式和设想,均会存在着一定的适用性。对不同白云石成因模式的真实性和适用性等核心问题的进一步探索,对于今后更好地应用和改进现有的、甚至总结出全新的白云石化作用模式都将有重要的现实意义。接下来,本文将着重对蒸发泵白云石化模式、回流渗透白云石化模式、混合水白云石化模式、埋藏压实白云石化模式、海水白云石化模式、热液白云石化模式等的真实性和相关问题,以及对微生物白云石化模式取得的研究进展进行探讨和评价。

2.1 蒸发泵白云石化模式的相关探讨

蒸发泵白云石化模式(图1a)形成于20世纪60年代,最早用于解释波斯湾萨布哈地区潮间带白云石的成因以及佛罗里达—巴哈马地区白云石的成因,经过几十年的不断总结和完善,已经得到人们的普遍认可,常被用来解释蒸发潮坪带上的白云石成因。虽然目前对于蒸发泵白云石化模式取得了很多共识,但在诸如萨布哈水文环境、原生沉淀或次生交代等问题上仍有争议,还有待进一步研究。

Mackenzie等^[31]认为萨布哈的水文环境主要由三个连续的阶段组成,即陆地洪水充注、毛细管浓缩和蒸发泵吸,这三个阶段随着白云石化卤水的演化

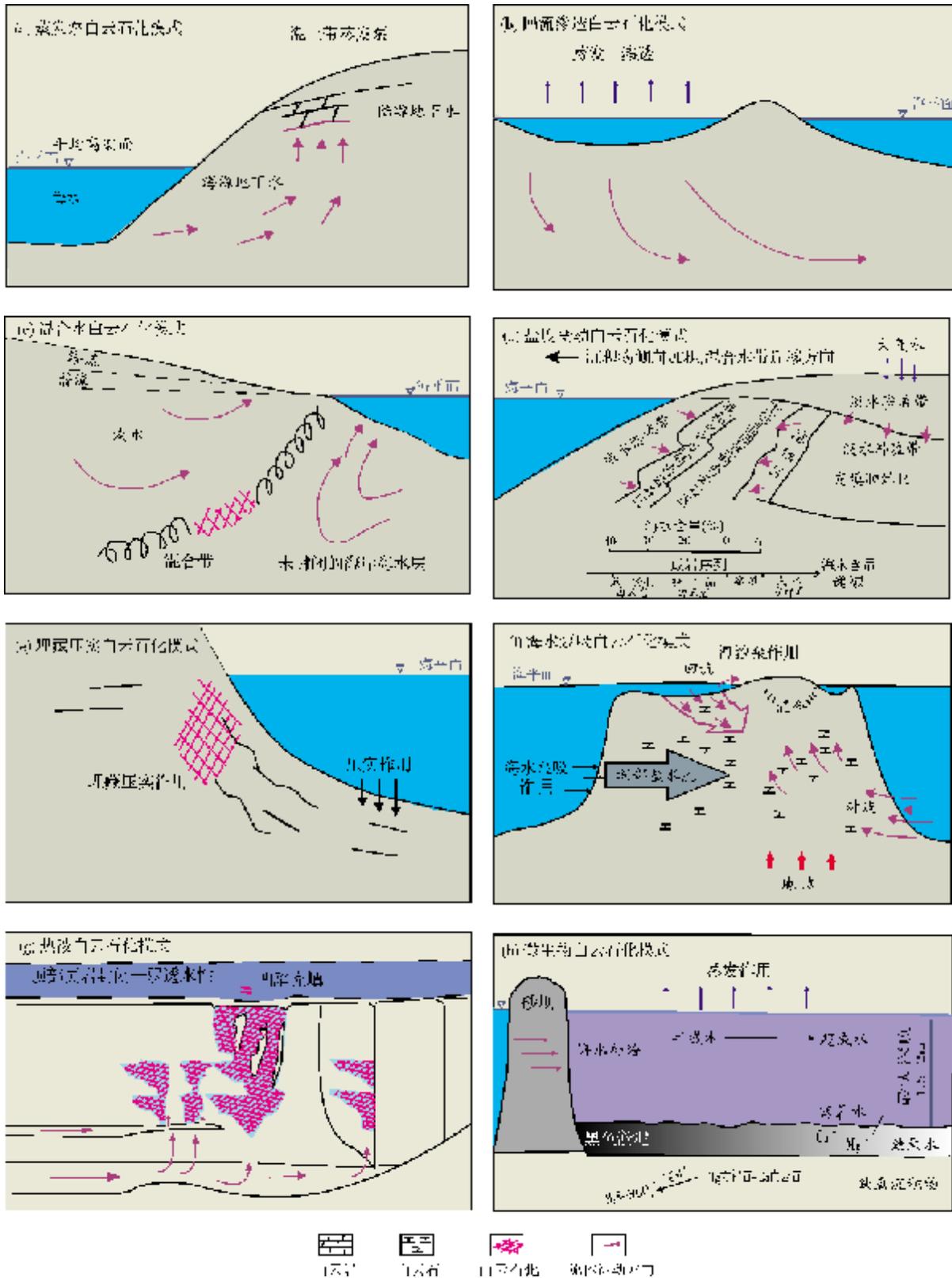


图1 几种白云石化模式概略性示意图(据表1和第2章节中所列相关文献改编)

而演变,并不断重复;而Wood等^[32]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。

对于萨布哈泥晶白云石的成因研究,虽然多数学者认为是高 Mg^{2+}/Ca^{2+} 的卤水交代早期沉积的文石或方解石形成的,但Wenk等^[33]利用透射电子显微镜和扫描电子显微镜对阿布扎比萨布哈白云石的成因进行分析,认为大部分白云石实际上是从孔隙水中直接沉淀而不是交代早期文石或方解石的结果。

近年来,随着微生物白云石化模式的发展,也有研究认为萨布哈的一些泥晶白云石与微生物白云石作用之间有着紧密的关系,在孔隙水趋于还原状态并在硫酸盐还原细菌或甲烷厌氧细菌导致碱性增强的地方,白云石化作用最为强烈。

2.2 回流渗透白云石化模式的相关探讨

回流渗透白云石化模式(图1b)自1960年Adams等^[8]提出用以解释美国德克萨斯西部二叠系生物礁复合体中白云石的成因至今,经过不断的深入发展,已经较好地解决了 Mg^{2+} 的来源以及水文循环机制等相关问题,因此得到了不少专家学者的认可,常被用来解释整个碳酸盐台地、甚至整个沉积盆地的白云石化作用。

尽管如此,但长期作为回流渗透模式经典实例的加勒比海南部Bonaire岛Pekelmeer潟湖石膏层之下的上新世—更新世石灰岩的白云石化作用,并没有像原来Deffeeyes等^[34]设想中的那样真实,在潟湖之下甚至没有发现回流的卤水^[35],其相应的水文循环机制与当初实验中所设定的基本相反:在较高盐度和正常盐度的潟湖沉积物中有一层渗透性较低的薄层黏土火山灰隔层,在火山灰隔层被破坏的地方会出现向盐沼供应海水的泉水上涌作用,上涌作用是Pekelmeer潟湖水文循环的主要机制,只在个别时间可能发生回流作用,但不可能有足够的卤水体积分交代形成大规模的白云石^[36-37]。

此外,回流渗透模式在一些问题的理解上也过于理想化,比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。同时,回流渗透白云石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

合关系尚不清楚。

2.3 混合水白云石化模式受到质疑

从混合水白云石化模式(图1c)建立的早期,就有较多的学者对在此模式下形成大规模台地白云石化作用机理的合理性提出了质疑^[38]。首先,如果考虑白云石的有序度,白云石和方解石在混合水中的饱和状态并不是像Badiozamani^[11]所计算的那样:当海水含量为10%~40%时,混合水对白云石过饱和,而对方解石不饱和,对白云石沉淀有利。但是Badiozamani^[11]是用基于古代有序白云石的溶度积来计算的,而实际上混合水带形成的是无序白云石。用无序白云石的溶度积来计算,仅当海水为30%~40%时,混合水才对白云石过饱和而对方解石不饱和,即对发生混合水白云石化作用的流体成分要求得相当苛刻^[38](图2)。

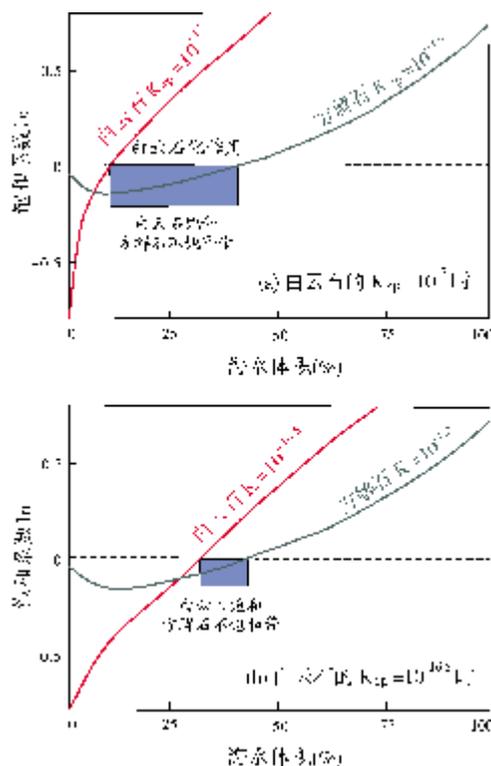


图2 地下水与海水的混合水对方解石和白云石饱和程度的影响(据Hardie^[38])

此外,按照混合水白云石化的重要理论支撑,混合带的水相对于碳酸钙不饱和,而相对于白云石过饱和,但许多混合带并非如此。Melim等^[39]对巴哈马

滩和佛罗里达南部近地表的混合带成岩作用的研究也表明,混合带不含白云岩,但该环境相对白云石是不饱和的,因为铸模孔到处可见。

之后,一些混合水模式的典型实例也被认为是其它白云石化模式的结果。Luczaj^[40]利用流体包裹体、岩相学、阴极发光、偏光显微镜观察、稳定同位素和有机质成熟度的数据分析,对Badiozamani^[11]提出的威斯康辛州中奥陶统白云岩的混合水成因提出了完全不同的观点,他认为这是热液白云石化作用的结果,它与这一区域MVT矿床以及钾硅酸盐矿物的成岩作用是同期的。

虽然混合水白云石化模式遭受到了比较多的质疑,但并没有完全被否定,在混合带中就不能形成白云石,只是普遍认为混合带中形成白云石的能力有限,形成的白云石体积相对较小^[41]。如郑荣才^[12]将此模式与盐度变动白云石化模式(图1d)相结合,较好地解释了广西崇左江洲地区下三叠统局部块状白云石的成因。

2.4 埋藏压实白云石化模式和海水泵吸白云石化模式广受关注

埋藏压实白云石化模式(图1e)的提出,是立足于区别近地表条件下发生的白云石化作用模式,这种模式下产生的白云石在许多碳酸盐沉积形成的沉积层中都可以观察得到,亦已受到了人们的关注,但是对于这是否会导致整个碳酸盐台地普遍发生白云石化仍存在很多争议。人们认为,这种模式中的驱动力来自于深海沉积的泥岩的压实作用和富Mg离子的流体对台地边缘的石灰岩的侵入作用,其中争议较大的问题是白云石形成和生长过程中所需要的Mg离子的来源。一般认为Mg离子的来源有四种可能:(1)来自天然盐卤(杂卤石、光卤石);(2)来自黏土矿物转化;(3)海相孔隙水(原生海水或原生蒸发水);(4)高镁方解石颗粒。但是这四种Mg离子来源方式都有一定的缺陷。目前,关于埋藏白云石化的Mg离子来源还没有定论。

自20世纪80年代 Saller等^[14]提出海水泵吸白云石化模式(图1f)以来,地质学家们不断地进行以海水作为白云石化唯一供给流体的可能性研究,并提出了海水在沉积物中运移的多种机理,逐渐受到人们的重视。这些驱动海水进入和穿越沉积物的机制包括Kohout对流作用、海水泵吸作用、潮汐泵吸作用

等。Vahrenkamp等^[42]通过对晚新生代巴哈马滩白云石的研究,得出其成因为海水泵吸白云石化的结果。

由海水直接作为白云石化的流体通过以上机制能够提供足够的动力学条件和充足的离子来源,但对海水本身的Mg离子浓度要求具有一定的局限性。海水(正常镁钙比)白云石化发生在石灰岩压实过程中或已固结的石灰岩地层中,属于成岩过程中形成的白云石。海水通过粒间孔或晶间孔渗透到石灰岩地层当中,在成岩过程中通过离子的交代作用形成白云石,该模式中形成的白云石主要为颗粒白云石和结晶白云石^[29]。

2.5 热液白云石化模式的相关探讨

20世纪80、90年代,由于学科间的相互渗透以及边缘学科的迅猛发展,Anderson等^[22]提出了与区域构造运动有关的构造热液白云石化模式,Cervato^[23]提出了与火山运动有关的火山热液白云石化模式,Mountjoy等^[24]提出了与变质作用有关的变质热液白云石化模式。进入21世纪,热液白云石化模式又有了新的发展。Davies等^[43]在上述机理的基础上,进一步深化和完善了热液白云石化模式的机理和应用条件,克服了某些局限性,使得热液白云石化的理论更加全面,促使热液白云石化模式(图1g)逐渐发展为人们所关注的主流模式。这些学者对热液和热液白云石的定义基本是统一的。Davies等^[43]对热液的定义是“进入宿主地层中的、温度高于主岩温度的流体或矿物,它代表了地热异常,并要求有一个流体运动的机制或通道”,他们对热液白云石的定义强调了其形成温度需要高于围岩。人们已经认识到热液白云石化过程中形成的储层与沉积——喷流型铅锌矿床和密西西比河谷型铅锌矿床具有共同的形成机制,它们均受构造和热流体流动的强烈控制^[44]。

与此同时,目前对热液白云石化及其对储层的改造作用的理解依然存在着较多误区,比如:对于多数认为是热液白云石的实例而言,没有可靠的证据表明它们与热液成因或热液叠加有关。比如,对热液白云石研究历史最长、资料积累最丰富之一的西加拿大阿尔伯达沉积盆地的泥盆系^[45]仍然没有解决与白云石化作用有关的Mg离子的来源和相应的质量平衡问题;鞍状白云石并非都是热液白云石,只有在某些情况下才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^[41]。尽管在热液系

统中白云石通常与某些贱金属矿床共生,但这并不能作为所有与层控贱金属矿物伴生的白云石热液成因的证据。

热液白云石化不都是有利于改善储层条件而使其增大孔隙度与改善渗透率,它是一把“双刃剑”,既对储层起建设性作用,又对储层起破坏性作用^[46]。郑剑锋等^[47]通过对塔里木盆地中生界热液白云石储层的研究也验证了此看法。

此外,对于热液白云石化模式中的诸如流体的驱动力、流体流动通道、含镁盐水来源及其主要控制因素等问题仍有待进一步深化理解。

2.6 微生物白云石化模式的研究进展

相比前面所提到的白云石化模式,微生物白云石化模式是近二十年来新近提出、具有突破性意义的一种白云石化作用模式。1997年,Vasconcelos等^[26]在巴西Lagoa Vermelha泻湖地表发现白云石可沉淀在常温环境下黑色富含有机质的沉积物中,且与微生物培养实验中沉淀出的白云石非常相似,从而根据Lagoa Vermelha泻湖同位素数据和水文模型提出了微生物白云石化模式(图1h)。该模式在南澳大利亚、阿拉伯海湾、西印度外陆棚边缘以及意大利南部等地区得到了不同研究者的肯定^[48],我国鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段白云石也可以解释为微生物成因^[49-50]。

经过研究的不断深入,沉积学家们不断地完善硫酸盐还原细菌沉淀白云石的机理,发现不仅硫酸盐还原细菌能促进白云石沉淀,甲烷厌氧细菌和嗜盐需氧细菌对白云石沉淀也有重要的促进作用。同时,也已经总结出了识别微生物白云石的形貌学特征和地球化学特征:(1)有机成因的白云石具有球粒状、哑铃状或花椰菜状的外形和放射纤维状的内部构造,与高温实验下形成的菱形白云石有所区别;(2)与有氧呼吸、硫酸盐还原作用有关的白云石中,以碳同位素值出现较大负偏为特征,甲烷厌氧氧化作用形成的白云石的碳同位素值可能会强烈负偏,而甲烷生成作用参与形成的白云石的碳同位素值可能呈现出较大正向偏移^[51-52]。通过这些特殊的形态特征、重要的科学结论来寻找微生物作用的证据,或可为古代相似成因白云石的成因研究提供一种标志,这也代表了近年来对“白云石”问题的一个重要进展。

3 结语

虽然上述不同种类的白云石成因模式相继被建立与应用,但仍然没有解决困扰人们已久的“白云石成因问题”,关于白云石成因模式的研究仍有待深入。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,仅用几个理想化的白云石成因模式很难完全解决自然界中不同地区、不同时间白云石的成因解释,尤其是人们在运用中忽略不同白云石化模式的真实性和适用性等核心问题时,碳酸盐白云石成因模式就有可能陷入被滥用的境地。在实际应用中,应结合具体情况具体分析,根据区域地质背景、白云石化流体运输动力、水文循环机制等实际情况辩证地应用目前已有的白云石成因模式,只有这样的成因解释才能更好地符合每一类白云岩的特殊成因。

经过大半个世纪的不断积累和发展,地学界对于上述20余种不同类型的白云石成因模式已经有了不同的认可度:萨布哈蒸发泵白云石化模式和回流渗透白云石化模式已经受到了普遍认可;混合水白云石化模式、出溶白云石化模式受到持续挑战;海水泵吸白云石化模式、埋藏白云石化模式、构造挤压白云石化模式、地形补给白云石化模式受到了广泛关注;热液白云石化模式(构造热液、火山热液、变质热液)和微生物白云石化模式已经作为新的主流模式成为人们关注的热点,尤其是微生物白云石化模式为今后解决“白云石”问题提供了一个全新的视角。相信多学科综合的新技术、新思路之不断应用必将会极大程度地推进碳酸盐白云石成因的研究。

参考文献

- [1] Dolomieu D G de. Sur un genre de pierres calcaires tres peu effervescentes avec les acides et phosphorescentes par la collision [J]. Journal de Physique, 1791, 39(1): 3-10.
- [2] Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L. Concepts and models of dolomitization[M]. SEPM Special Publication 28, 1980: 1-328.
- [3] 刘树根,黄文明,张长俊,等. 四川盆地白云岩成因的研究现状及存在问题[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(2): 6-15.
- [4] 南君祥,杨奕华. 长庆气田白云岩储层的成岩作用与成岩圈闭[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 44-48.
- [5] Warren J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1/3): 1-81.

- [6] Alderman A R, Skinner H C W. Dolomite sedimentation in the southeast of South Australia[J]. *American Journal of Science*, 1957, 255(8):561-567.
- [7] 方少仙,侯方浩,董兆雄,等. 上震旦统灯影组中非叠层石生态系兰细菌白云岩[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1):96-106.
- [8] Adams J F, Rhodes M L. Dolomitization by seepage refluxion [J]. *AAPG Bulletin*, 1960, 44(12):1912-1920.
- [9] Hsu K J, Siegenthaler C. Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem[J]. *Sedimentology*, 1969, 12(1/2):11-25.
- [10] Goodell H G, Gaman R K. Carbonate geochemistry of superior deep test well, Andros Island, Bahamas[J]. *AAPG Bulletin*, 1969, 53(3):513-536.
- [11] Badiozamani K. The Dorag dolomitization model: Application to the Middle Ordovician of Wisconsin[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1973, 43(4):965-984.
- [12] 郑荣才,柳梅青. 试论块状白云岩的混合水成因模式[J]. *矿物岩石*, 1992, 12(1):55-64.
- [13] Carballo J D, Land L S, Miser D E. Holocene dolomitization of supratidal sediments by active tidal pumping[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57(1):153-165.
- [14] Saller A H, Land L S. Petrologic and geochemical constraints on the origin of subsurface dolomite, Enewetak Atoll: An example of dolomitization by normal seawater [J]. *Geology*, 1984, 12(4):217-220.
- [15] Mullins H T. Authigenic dolomite in Bahamian peri-platform slope sediment[J]. *Geology*, 1985, 13(4):292-295.
- [16] Illing L V. Deposition and diagenesis of some upper Paleozoic carbonate in western Canada[C]// *Proceedings of the Fifth World Petroleum Congress, Section 1, New York, 1959*:23-52.
- [17] Zdzislaw, Migaszewski, 著. 白云岩成因详述[J]. 圣继福, 译. 国外矿床地质, 1990, (1):1-8.
- [18] 郑荣才,王成善,朱利东,等. 酒西盆地首例湖相“白烟型”喷流岩——热水沉积白云岩的发现及其意义[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2003, 30(1):1-8.
- [19] 王国忠,吕炳全,全松青. 海南岛排浦更新世沉积的白云岩化作用[J]. *沉积学报*, 1984, 2(4):87-112.
- [20] 雷怀彦,朱莲芳. 四川盆地震旦系白云岩成因研究[J]. *沉积学报*, 1992, 10(2):69-78.
- [21] Garven G, Freeze R A. Theoretical analysis of role of groundwater flow in the genesis of stratabound ore deposits: Quantitative results[J]. *American Journal of Science*, 1984, 284(10):1125-1174.
- [22] Anderson G M, Macqueen R W. Mississippi valley -type lead-zinc deposits[J]. *Geoscience Reprint Series: Ore Deposit Models*, 1987, 3(1):79-90.
- [23] Cervato C. Hydrothermal dolomitization of Jurassic -Cretaceous in the southern Apls (Italy):Relation to tectonic and volcanism[J]. *Geology*, 1990, 18(5):458-461.
- [24] Mountjoy E W, Halim -Dihardja M. Multiple phase fracture and fault-controlled burial dolomitization, Upper Devonian Wabamun Group, Alberta[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, 61(4):590-612.
- [25] 邬金华, Franlick P. 米粒状白云石及其出溶成因[J]. *沉积学报*, 1992, 10(2):45-52.
- [26] 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(3):378-390.
- [27] Morrow D W. Regional subsurface dolomitization: models and constraints[J]. *Geoscience Canada*, 1998, 25(2):57-70.
- [28] 金振奎,冯增昭. 滇东—川西下二叠统白云岩的形成机理——玄武岩淋滤白云石化[J]. *沉积学报*, 1999, 17(3):383-389.
- [29] 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*, 2010, 46(6):1010-1020.
- [30] 朱筱敏. *沉积岩石学*[M]. 4版. 北京:石油工业出版社, 2007:193-199.
- [31] Mackenzie J. Holocene dolomitization of calcium carbonate sediments from the coastal Sabkhas of Abu Dhabi, U.A.E[J]. *The Journal of Geology*, 1981, 89(2):185-198.
- [32] 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(3):259-268.
- [33] Wenk H R, Hu M, Frisia S. Partially disordered dolomite: Microstructural characterization of Abu Dhabi sabkha carbonates [J]. *American Mineralogist*, 1993, 78(7/8):769-774.
- [34] Deffeyes K S, Lucia F J, Weyl P K. Dolomitization of recent and Plio-Pleistocene sediments by marine evaporate waters on Bonaire, Netherlands Antilles[C]// Pray L C, Murray R C. *Dolomitization and limestone diagenesis. SEPM Special Publication 13*, 1965:71-88.
- [35] Lucia F J. Recent sediments and diagenesis of south Bonaire, Netherlands Antilles[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1968, 38(3):845-858.
- [36] Murray R C. Hydrology of South Bonaire, Netherlands Antilles: A rock selective dolomitization model[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39(3):1007-1013.
- [37] Fouke B W, Beets C J, Meyers W J, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ chronostratigraphy and dolomitization history of the Seroe Domi Formation, Curaçao (Netherlands Antilles)[J]. *Facies*, 1996, 35(1):293-320.
- [38] Hardie L A. Dolomitization: A critical view of some current views[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57(1):153-165.
- [39] 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, 76(6):904-913.
- [40] Luczaj J A. Evidence against the Dorag (mixing-zone) model for dolomitization along the Wisconsin Arch: A case for hy-

- drothermal diagenesis[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1719-1738.
- [41] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal[M]// Braithwaite C J R, Rizzi G, Drake G. The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs. London: Geological Society of London Special Publication 235, 2004: 7-63.
- [42] Vahrenkamp V C, Swart P K. Late Cenozoic dolomites of the Bahamas: Metastable analogues for the genesis of ancient platform dolomites[M]// Purser B, Tucker M, Zenger D. Dolomites: A volume in honor of dolomieu. International Association of Sedimentologists, Special Publication 21, 1994: 133-153.
- [43] Davies G R, Smith L B Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [44] 黄思静, 张雪花, 刘丽红, 等. 碳酸盐成岩作用研究现状与前瞻[J]. *地学前缘*, 2009, 16(5): 220-231.
- [45] Reinhold C. Multiple episodes of dolomitization and dolomite recrystallization during shallow burial in upper Jurassic shelf carbonates eastern Swabian Alb, southern Germany[J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 121(1/2): 71-95.
- [46] Smith L B Jr. Origin and reservoir characteristics of Upper Ordovician Trenton-Black River hydrothermal dolomite reservoirs in New York[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1691-1718.
- [47] 郑剑锋, 沈安江, 潘文庆, 等. 塔里木盆地地下古生界热液白云岩储层的主控因素及识别标准[J]. *海相油气地质*, 2011, 16(4): 47-56.
- [48] 杨华, 王宝清. 微生物白云石模式评述[J]. *海相油气地质*, 2012, 17(2): 1-7.
- [49] 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 106-112.
- [50] 侯方浩, 方少仙, 赵敬松, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境模式[J]. *海相油气地质*, 2002, 7(1): 38-46.
- [51] 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.
- [52] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 等. 微生物白云岩模式研究进展[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 52-64.

编辑: 赵国宪

Research Advances of Dolomite Genesis Models and Discussion on Applicable Models

Wang Maolin, Zhou Jingao, Chen Dongxia, Hao Yi, Peng Huijie, Wang Chao, Jiang Yuting, Xie Mingxian

Abstract: On the basis of reviewing a number of references about dolomitization models, the known dolomitization models can be divided into primary dolomitization models and secondary dolomitization models in genesis. The secondary dolomitization models can be further classified into high Mg/Ca ratio dolomitization models, low Mg/Ca ratio dolomitization models, normal Mg/Ca ratio dolomitization models and other dolomitization models in different Mg/Ca ratios. To improve present models and create new models, some classical models are discussed on their authenticity and applicability. The Sabkha dolomitization model and the seepage reflux dolomitization model have widely been recognized. The mixing zone dolomitization model or the Dorag model encounters a sustaining challenge for doubt. An attention is great interested to the seawater dolomitization model and the burial dolomitization model. The hydrothermal dolomitization model and the microbial dolomitization model have gradually become the new mainstream model.

Key words: Dolomite; Dolomitization; Genesis model; Research advance; Applicability

Wang Maolin; male, Master degree in progress at Institute of Geoscience of China University Petroleum, 18 Fuxue Rd., Beijing, 102249, China