

白云石有序度的控制因素^①

高子颀 朱世发

(中国石油大学地球科学学院 北京 102249)

摘 要: 通过统计大量白云石有序度的数据,并综合考虑数据的完整性、可靠性、研究意义,挑选了3种白云石化机理:准同生白云石化、混合水白云石化和埋藏白云石化的数据进行研究,得出深埋藏成因白云石有序度最大,浅埋藏成因白云石有序度和混合水白云石有序度相近,准同生白云石有序度最小的结论。同时综合前人对影响白云石有序度因素的研究实例、高温人工合成白云石的实验结论,进一步探索了白云石化流体中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 比值、 $MgCO_3$ 摩尔含量、白云石含量、杂质金属离子含量、埋藏温度和准同生、混合水、埋藏成因白云石有序度的关系。

关键词: 白云石 白云石化机理 有序度 埋藏白云石 混合水白云石 准同生白云石

中图分类号: P581

文献标识码: A

文章编号: 1674-098X(2018)03(b)-0033-07

白云石(dolomite)的成因,一直是沉积学界的热点和难点。关于白云石的成因以及白云石化机理,前人提出了若干模式。其中较为经典的有萨布哈环境下常见的准同生白云石化^[1,2]、渗透-回流白云石化^[3-4]、正常海水白云石化^[5]、混合水白云石化^[1,6]、埋藏白云石化^[7-8]、热液白云石化^[5]以及近年来兴起的微生物白云石化作用^[9-10],也有学者提出比较新颖的模式如海盆局限期深水准同生白云石^[11]、层状水温控云灰互层模式^[12]等。

白云石的成因研究主要是从岩性组合、岩石结构、地球化学指标^[13]、晶体表面纳米级微观形貌^[14-15]、晶体结构等方面展开,并综合考虑同生、成岩、后生的作用过程以及碳酸盐的沉积环境,进一步推断出白云石的成因^[16]。张杰,等(2014)认为白云石晶体结构分析是直接识别白云石形成环境的有效手段,并从有序度等晶体结构参数角度对白云石进行了研究^[17]。晶体结构中占据正确位置的质点的比率减去占据错误位置的质点的比率称为晶体的有序度(Ordering),其数值范围为0(完全无序)~1(完全有序)^[18]。

Fuschthaler和Goldschmidt(1965)使用XRD技术,发现有序度高的白云石具有超结构反射,其(015)、(110)反射峰相对较强,通过测定(015)晶面反射和(110)晶面反射的强度比值来计算有序度(δ)^[19],如公式(1)所示。

$$\delta = \frac{I(015)}{I(110)} \quad (1)$$

即使学者们公认大多数古代白云石是在较低的自然温度下形成的,但在地表温度下合成白云石非常困难^[20],并且相较于大多数古代白云石,现代白云石往往有序度差,且含有过量的钙元素^[21]。高温实验合成白云石过程中,其有序度逐渐升高,且最终晶体在纳米级别下的形态(nanotopography)和古代白云石一致,因此即使它们形成的外在环境差异较大,也可推断它们在形成时有着相似的机理^[22],所以学者们也通过人工合成白云石的方法来进一步理解白云石的生成机理。

本文欲探究控制白云石有序度的因素,首先汇总经典成因机理白云石有序度的均值特征,由于人们对准同生白云石

化、混合水白云石化、埋藏白云石化研究更为深入并且数据更为齐全,因此,本文将选取这3种机理所形成的白云石的有序度数据进行研究,运用IBM SPSS Statistics 23软件先分析有序度数据的频率特性,再结合标准差和平均值得出各成因机理白云石有序度大小的定性结论。

有序度只能表征复杂地质条件综合作用的最终结果。如果有序度不高可能是由多种因素的不理想或者是一种主控因素不理想所致,但是有序度较高就能表明地质环境对于白云石晶体表征出较高有序度的影响总体是有利的。准同生、混合水、埋藏白云石化这3种机理都分别代表了3种地质环境,本文将结合前人对控制因素的研究、高温人工合成白云石实验的依据和结论,选取因素并探究它们对准同生、混合水、埋藏白云石有序度的关系。

1 白云石化机理及有序度特征

1.1 准同生白云石化

经典理论认为:热带潮上地区松散沉积物之间的孔隙水会强烈地蒸发,因而海水通过毛细管作用进入到孔隙水中,使得孔隙水的含盐度不断变大,且石膏的沉淀导致孔隙水中镁离子和钙离子的比值升高,从而文石不可避免地被交代成白云石^[23]。准同生白云石除具有颗粒细小、可能存在石膏假晶、鸟眼构造等岩石学特征外,往往还具有较高的碳氧同位素值、高锶同位素比值、和地表温度相近的包裹体均一温度等地球化学特征^[11,24,26]。余宽宏,等(2011)提出海盆局限期深水准同生白云石化作用:海盆局限阶段水体盐度变高,使得斜坡以及海底松软碳酸盐沉积物发生白云石化,形成深水环境的泥粉晶白云岩其地球化学特征与经典准同生白云石相似,但区别在于其发育位置在盆地边缘或斜坡,且无蒸发盐类伴生^[11],但是这种模式与land(1985)提出的由于海水浓缩,并通过一定的动力学机制使得下伏地层中的方解石被交代为白云石的“正常海水白云石化作用”^[5]有一定相似之处。

本文探究准同生白云石有序度特征时,选取的数据中6组来自鄂尔多斯盆地马家沟组^[24],7组来自川东地区石炭系^[25],15组来自阿尔卑斯山地区Hauptdolomit组^[27],7组来自塔里

①作者简介:高子颀(1997—),女,汉族,江苏兴化人,在读本科,主要从事沉积学方向的研究工作。

木盆地塔中1井^[26],结果如图1所示,平均有序度为0.57,标准差为0.195。

1.2 混合水白云石化

K. Badiozamani(1973)针对广泛分布于陆表海、陆棚或构造高地而与蒸发岩无关的白云石,提出了一个不需要蒸发作用以及高的镁离子、钙离子比值的成因模式:以Wisconsin arch地区为例,浅海环境的碳酸盐沉积物周期性暴露于大气水而发生的白云石化作用,称为“混合水白云石化”,且在5%~30%海水和淡水的混合液实验中,观察到方解石被白云石交代的现象^[28]。但是Luczaj(2006)证明Wisconsin arch地区的白云石化和热液作用有关,因此,对混合水白云石化模型的可行性提出强烈质疑^[29]。即使曾经作为混合水白云石的典例遭受到质疑,但是解释处在古地理位置的相对高点(可以间歇受到大气淡水淋滤)、碳氧同位素较轻($\delta^{18}\text{O}$ 为-5‰~+5‰, $\delta^{13}\text{C}$ 为-10‰~+3‰)、成岩流体盐度低于正常海水的白云石的成因还是具有一定适用价值^[30-31]。值得注意的是:海平面升降所导致的水压头的变化,可以让大规模的海水渗入台地内部,这使得在一定的地质历史时期内大规模的白云石化是可能的^[32]。

本文探究混合水白云石有序度特征时,选用的数据6组来自羌塘盆地中央隆起带^[30],13组来自川东北元坝气田^[31]。结果如图2所示,平均有序度为0.77,标准差为0.11。

1.3 埋藏白云石化

白云石在地表温度下合成非常困难,但是高温条件下却可以人工合成,且温度越高,同等数量方解石被交代成白云石所消耗的时间越短^[22],地下埋藏环境多为高温,有利于白云石化反应地进行。埋藏白云石的地球化学测试结果中的一般冰点较高、包裹体均一温度较高(>100℃)^[33], $\delta^{18}\text{O}$ 小于-6.5‰^[34],指示的成岩流体的盐度和温度较高。地下深部多为还原环境,从而 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 易于置换白云石晶格中的 Mg^{2+} ,从而形成铁白云石。王丹(2010)将埋藏白云石根据在岩石中的产状、晶粒大小、晶型、晶面特征、接触关系分为6种类型,并与其对应的白云石化深度分为浅埋藏、浅-中埋藏、中-深埋藏、一般情况下-深埋藏四类^[35]。可见白云石化深度对白云石形成的机理的判断是至关重要的,因此,不能在做数据统计时将埋藏成因的白云石统一处理。但是在王丹(2010)对埋藏白云石形成深度的界定中,并没有给出明确的数值点,所以,本文根据文献中作者对白云石化深度的描述,将埋藏成因的白云石简单分为浅埋藏成因白云石、深埋藏成因白云石两大类。

本文探究浅埋藏成因白云石有序度特征时,选用的数据中18组来自川东地区石炭系^[25],21组来自四川飞仙关组^[36],14组来自塔里木盆地寒武-奥陶系^[37],有序度均值为0.77,标准差为0.146,见图3。

本文探究深埋藏成因白云石有序度特征时,选用的数据中1组来自川东地区石炭系^[25],10组来自阿尔卑斯山地区Hauptdolomit组^[27],18组来自二连盆地地下白垩统^[38],3组数据来自四川盆地^[39],有序度均值为0.84,标准差为0.148,见图4。

2 有序度的控制因素

据J. M. Gregg, et al(2015)研究,高温、高碱度、高镁离子和钙离子的浓度、高Mg和Ca比值、高流体和岩石比值(Fluid to rock ratio)、足够的成核空间是白云石形成高度有序的晶体结构的微观因素,但生物因素的影响目前还不

明确^[40]。

有序度是白云石晶体生长过程中温度、压力、流体特征等的综合表征,所以即使在同一研究区,地质体形态引起地质环境的变化,会间接导致有序度的改变。第一种情形为地质体形态导致各部分白云石化机理不同,从而导致各部分白云石有序度不同。如田永净,等(2014)对川东元坝气田的研究,礁间滩处为准同生白云石、礁后滩处为正常海水白云石、礁盖处为混合水白云石,这三处白云石有序度差异均较大^[31]。第二种情形为地质体形态导致同一白云石化流体的作用程度不同,从而导致各部分白云石有序度不同。如姜楠,等(2013)对普光气田的研究,在同一滩体内,白云石化流体均为混合水,但受水动力的影响,白云化程度由低向高,由下向上,逐渐增强^[41]。

因此,探究单个因素对白云石有序度的影响显得比较困难,前人曾探究过有序度和白云石粒度^[11]、Mg和Ca的摩尔数量比^[25]、埋藏温度^[27]、 CaCO_3 或 MgCO_3 的摩尔含量^[24-25,27,31,36,38,42]、白云石含量^[36,38,42]、杂质金属离子^[42]、碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)^[43]等因素之间的关系。

本文结合影响白云石有序度的微观因素以及现有文献中数据的可靠性,选择 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度比值、 MgCO_3 摩尔含量、白云石含量、杂质离子含量和埋藏温度这5个因素进行探究。

2.1 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度比值

准同生模式中白云石化流体的镁离子、钙离子浓度比值为10~30,正常海水模式的镁离子、钙离子浓度比值为5.2~10,混合水具有较低的镁离子、钙离子浓度的比值,约为1.24~3.64^[44]。对比图1准同生白云石有序度平均值、图2混合水白云石有序度平均值和田永净,等(2014)研究区正常海水白云石有序度平均值(0.68),可知混合水白云石有序度最高、准同生白云石有序度最低、正常海水成因白云石有序度介于且其中。混合水本身具有较低的镁离子、钙离子浓度的比值,有利于减缓结晶速率从而形成晶格有序的白云石。准同生模式中的白云石化流体镁离子、钙离子浓度比值高,使得化学反应式(2)向右进行,且较高的反应物浓度会提高化学反应速率,从而使得白云石快速成核、生长,在G Montes-Hernandez, et al(2014)高温合成白云石实验中,合成白云石的第一步动力学机制即所有的方解石全部转化为原白云石(有序度很低的白云石)^[45],此处可解释准同生白云石由于快速结晶作用所导致的较低的有序度。



2.2 MgCO_3 摩尔含量

Kaczmarek, et al(2017)在高温下(218℃)人工合成白云石时,观察到镁元素摩尔分数(Dolomite stoichiometry)和有序度呈正比关系,但将此结论应用到自然界中的白云石时,与蒸发作用有关的白云石需要被排除在外^[15]。如图5、图6所示,非准同生成因的白云石和有序度呈正相关,但准同生成因的白云石却和有序度呈负相关。青藏高原沱沱河地区新生代准同生湖相白云石的例子也可以佐证,该研究区样品显示有序度的提高对应碳酸镁摩尔分数的降低^[16]。

图5数据中有10组来自鄂尔多斯盆地马家沟组^[24],19组来自川东地区石炭系^[25],15组来自阿尔卑斯山Hauptdolomit组^[27],13组来自川东北元坝气田^[31],33组来自四川盆地飞仙关组^[36],18组来自二连盆地地下白垩统^[38]。

图6数据中有6组来自鄂尔多斯盆地马家沟组^[24],7组来

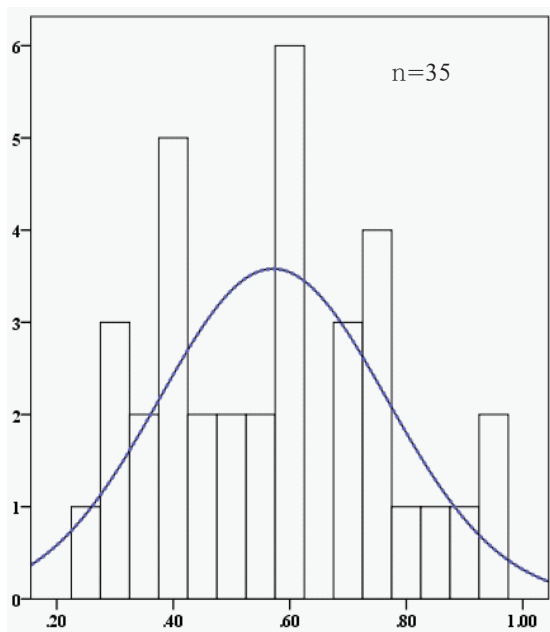


图1 准同生白云石有序度频率分布直方图

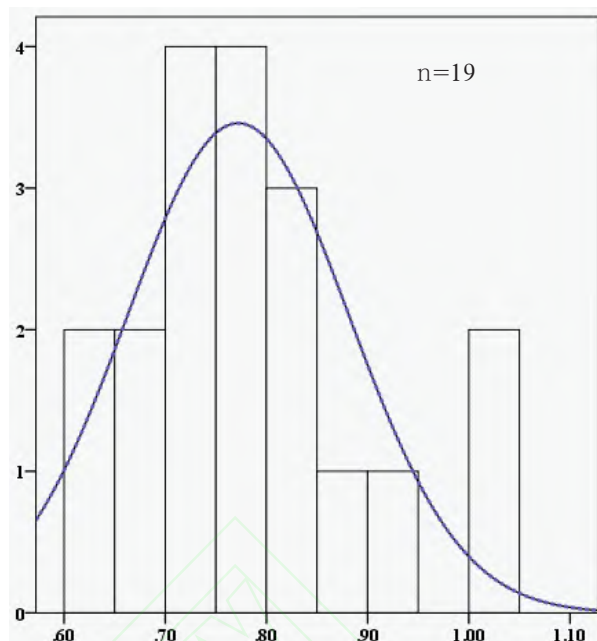


图2 混合水白云石有序度频率分布直方图

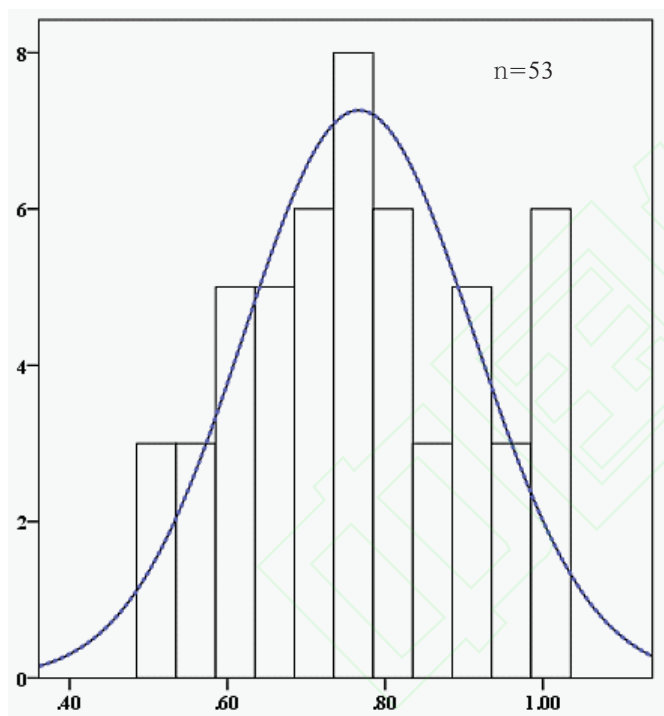


图3 浅埋藏成因白云石有序度频率分布直方图

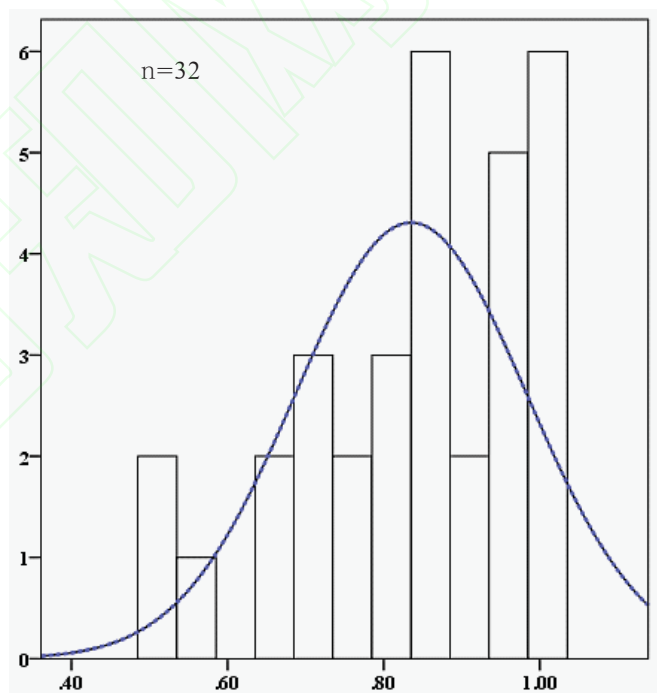


图4 深埋藏成因白云石有序度频率分布直方图

自川东地区石炭系^[25]。

2.3 白云石含量

据G Montes Hernandez,et al(2014)高温(>100℃)合成化学计量白云石的实验,白云石晶体从无序达到有序状态时,白云石的含量在100℃合成实验中仅有10%,在200℃合成实验中达50%^[45]。可见白云石晶体达到有序状态时,白云石含量不是100%,且在生长过程中,白云石含量与有序度呈正相关。但是如果白云石含量进一步增多,则单个晶体的生长空间减少,从而导致有序度下降,因此,在这种情况下白云石含量与有序度呈负相关^[38]。

图7中浅埋藏数据中21组和深埋藏数据中5组选自四川盆地飞仙关组^[36],深埋藏数据中18组选自二连盆地白垩统^[38]。

如图7所示,浅埋藏成因的白云石很可能处在从无序向

有序转化的阶段,因此,白云石含量和有序度呈微弱的正相关,但深埋藏成因白云石很可能处于达到有序状态后,白云石含量进一步增加的阶段,因此白云石含量和有序度呈很好的线性负相关。

图8中埋藏白云石数据中26组选自四川盆地飞仙关组^[36],18组选自二连盆地白垩统^[38],准同生白云石中6组选自青藏高原沱沱河地区新生代湖相白云石^[16],6组选自沾化凹陷邵54井^[46]。

如图8所示,埋藏白云石普遍有序度较高,但白云石含量较低;准同生白云石普遍有序度较低,但白云石含量较高。

2.4 杂质金属离子含量

地下深部的埋藏环境基本呈还原性,有利于 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 进入白云石晶格,因而占据了晶格中本应该由 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 所

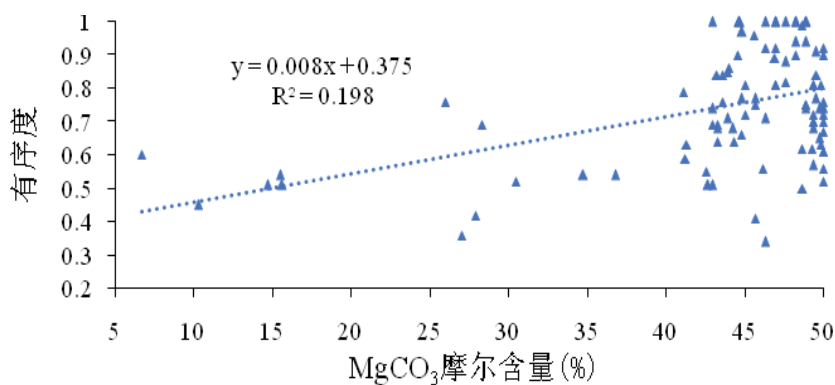


图5 非准同生白云石有序度及其MgCO₃摩尔含量交会图

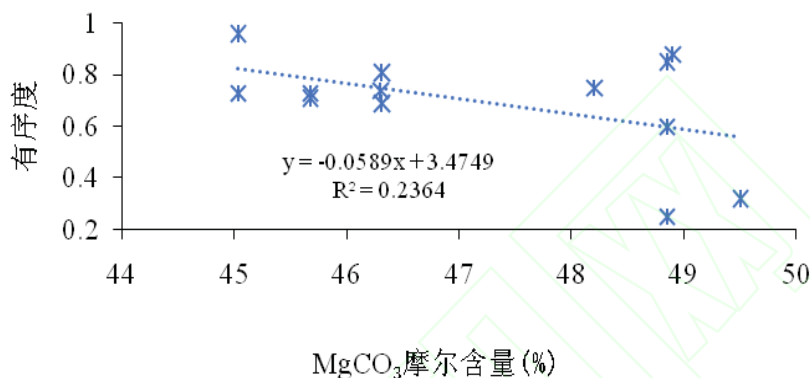


图6 准同生白云石有序度及其MgCO₃摩尔含量和交会图

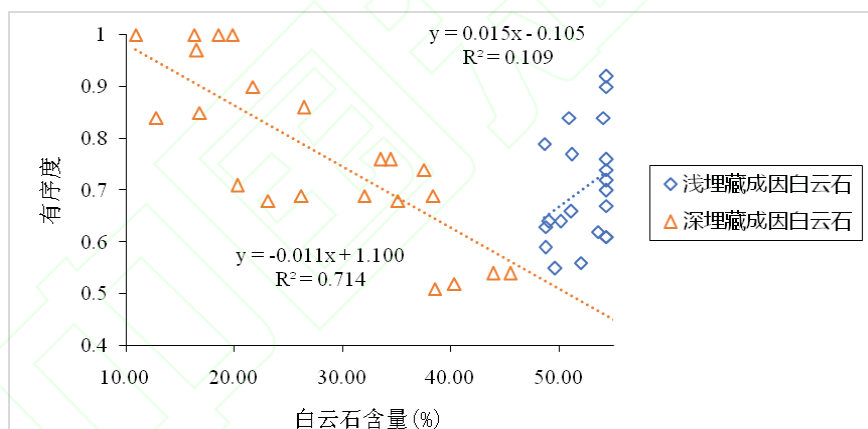


图7 深、浅埋藏阶段形成的白云石有序度及其含交会图

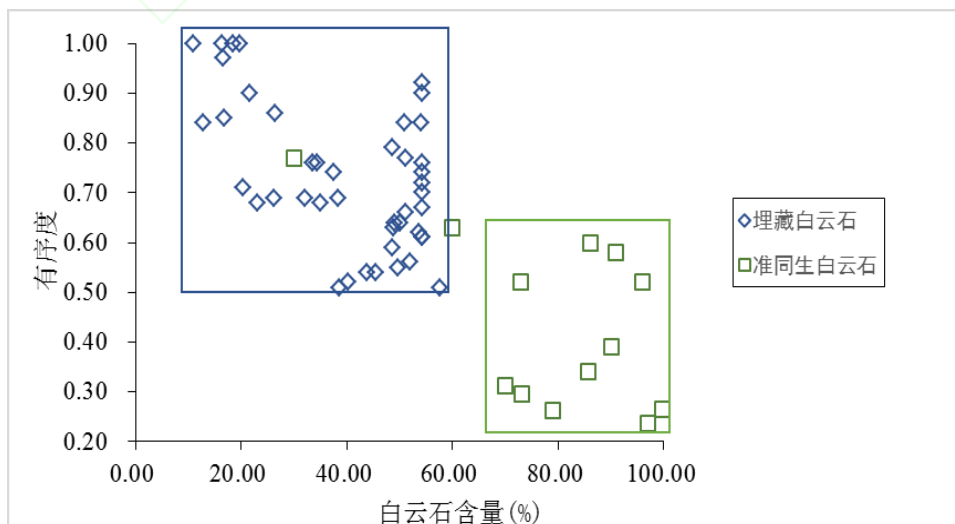


图8 埋藏、准同生白云石有序度及其含量交会图

占据的位置,这必然会使XRD测试中晶面反射强度发生变化。根据公式(1)和化学反应式(3)^[38],理论上白云石晶体的有序度会因此降低。



如图9所示,研究区1中的15组数据选自阿尔卑斯山 Hauptdolomit组的埋藏白云石^[27]。研究区2中的10组数据选自鄂尔多斯盆地的埋藏白云石^[24]。研究区3中的13组数据选自川东北元坝气田的混合水白云石^[31]。

研究区1的白云石埋藏较深且由于地温高,因而经历了轻微的变质作用,其有序度和Fe含量呈较好的线性负相关,符合上文的理论推断。研究区2的混合水白云石发生白云石化的深度较浅,其有序度和Fe含量的没有体现出负相关,此处与理论推断的结果相悖,可能是由于其形成深度较浅从而导致埋藏温度较低,使得后期温度对晶格改造的影响较小,且白云石晶格本身未达到比较有序的状态,导致其无序的原因很可能不只是 Fe^{2+} 进入晶格。因此,在某个合适的深度范围内,白云石化深度越深,杂质离子对有序度的影响很可能越大,但随着深度增加,地温也会相应增加(一般情况下地温梯度为正),高温有利于促进白云石晶格的调整进入有序状态,即排斥杂质离子的进入,此处可能存在两种化学反应的对抗,但最终白云石的晶体结构取决于其是否能在现有的温度、压力、孔隙水性等环境因素下达到稳定状态。

2.5 埋藏温度

Kaczmarek, et al(2017)在人工合成白云石的实验中总结道:高温可以使得白云石化反应更快且获得产物的有序度更高^[15]。较高的埋藏温度不仅可提供化学式(2)向右反应时所需要的活化能,还可以提高反应速率。阿尔卑斯山 Hauptdolomit组的白云石原本的形成机理是准同生白云石化,在后期由于较高的埋藏温度则叠加了埋藏白云石化,且不同取样地区的埋藏温度不同。不同取样地区的白云石平均有序度和对应的埋藏温度如图10所示,可见随着埋藏温度的升高,白云石有序度协同升高,但进入晶格中的 Fe^{2+} 的含量总体下降,并且白云石有序度和 Fe^{2+} 的含量的相关系数也由0.345下降至0.04,可见当埋藏温度升高到一定程度,杂质离子含量对有序度影响可忽略,地温则成为白云石有序度的主控因素,这同时也解释了在1.3中浅埋藏成因白云石有序度(0.77)略小于深埋藏成因白云石有序度(0.84)。

3 展望

(1)高温合成白云石实验对自然界白云石的研究有着很好的启发作用,但成岩演化的复杂性和地下地质条件的非均一性能否保证人工合成白云石的结论的普适性,还需进一步的事实检验。

(2)微生物作用已经被证明对地表环境下白云石的生成有重要意义,它对白云石的晶体结构、本文探究的有序度和选定因素关系的影响还需进一步研究。

(3)本文选取的白云石样品,其成因机理比较简单,而自然界中白云石可能进行了多种白云化成因机理的叠加作用,那么本文所探究的有序度和选定因素的关系是否能继续运用、能运用到什么程度,还有待事实检验。

4 结论

(1)三种经典白云石化机理中,深埋藏成因白云石有序度最高,混合水白云石有序度与浅埋藏成因白云石有序度相

近,准同生白云石有序度最低。

(2)地质体形态可以通过影响白云石化流体的成分或者白云石化流体的作用程度来间接控制地质体各部位的白云石有序度。

(3)白云石化流体中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 比值越高,则白云石有序度相应越低。

(4)准同生白云石有序度一般与 MgCO_3 含量呈反比关系,混合水白云石、埋藏白云石一般与 MgCO_3 含量呈正比关系。

(5)深埋藏形成的白云石有序度和白云石含量呈反比关系,埋藏深度过浅则呈正比关系或者相关性不明显。准同生白云石一般白云石含量高,有序度低;埋藏白云石一般白云石含量较低,有序度高。

(6)中等埋藏深度下,杂质金属离子含量升高则有序度下降,随着埋藏深度的增加,在地温梯度为正的情形下,杂质金属离子含量和有序度的相关性逐渐减弱。

(7)当埋藏温度达到一定程度(具体数值应该与研究区有关),将成为白云石有序度的主控因素,可促进白云石晶格调整至最有序状态。

参考文献

- [1] K J Hsü, J Schneider. Progress Report on Dolomitization—Hydrology of Abu Dhabi Sabkhas, Arabian Gulf[M]. Springer Berlin Heidelberg, 1973: 409–422.
- [2] Shinn EA, Ginsburg RN, Lloyd R M. RECENT SUPRATIDAL DOLOMITE FROM ANDROS ISLAND, BAHAMAS[A]. 1965: 112–123.
- [3] Deffeyes KS, Lucia FJ, Weyl PK. Dolomitization of recent and Plio-Pleistocene sediments by marine evaporite waters on Bonaire, Netherlands Antilles[A]. Special Publications, 1964: 71–88.
- [4] Adams MLRJE. Dolomitization by Seepage Refluxion[J]. Aapg Bulletin, 1960, 44(12): 1912–1920.
- [5] Land LS. The origin of massive dolomite[J]. Journal of Geological Education, 1985, 33(2): 112–125.
- [6] Badiozamani K. The Dorag dolomitization model—application to the middle Ordovician of Wisconsin[J]. Jour. sediment. petrol, 1973, 43(4): 965–984.
- [7] 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(12): 71–95.
- [8] Kupecz JA, Kerans C, Land LS, et al. Deep-burial dolomitization in the Ordovician Ellenburger Group carbonates, West Texas and southern New Mexico; discussion and reply[J]. Journal of Sedimentary Research, 1988, 58(5): 908–913.
- [9] Warthmann R, Van Lith Y, Vasconcelos C, et al.

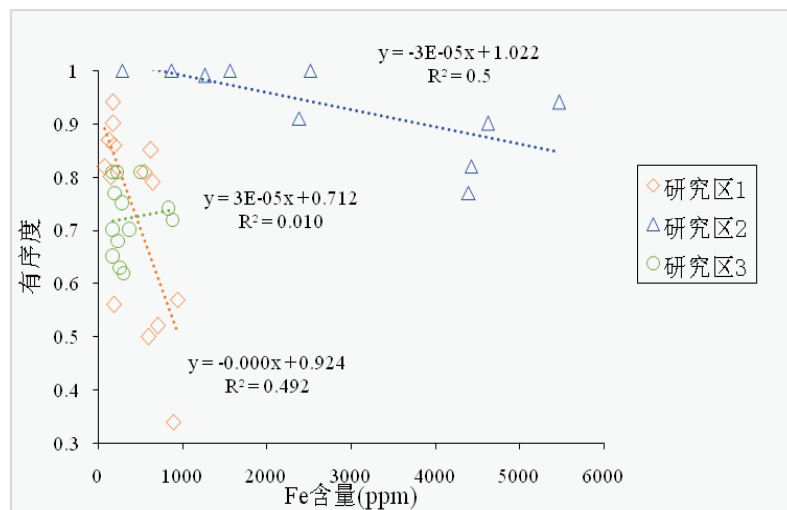


图9 白云石Fe含量及其有序度交会图

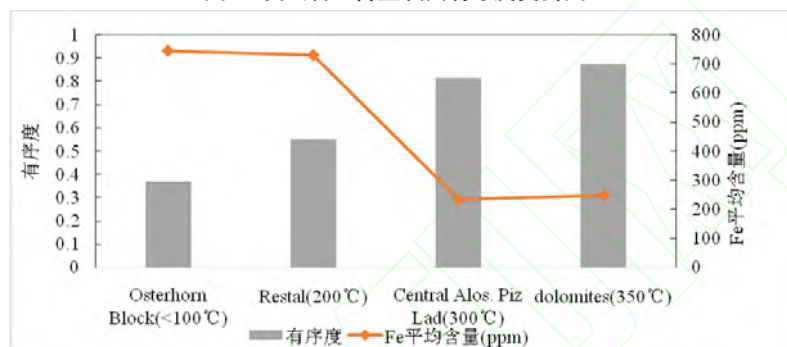


图10 Hauptdolomit组各取样地区处白云石有序度均值直方图和Fe平均含量折线图

- Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments[J].Geology,2000,28(2000):1091.
- [10]Vasconcelos C,Mckenzie JA,Bernasconi S, et al. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures[J].Nature,1995,377(6546):220-222.
- [11]余宽宏,金振奎,周勇,等.塔里木盆地东部地区寒武纪海盆局限期深水准同生白云岩化作用研究[J].沉积学报,2011,29(6):1041-1047.
- [12]陈永权,周新源,赵葵东,等.塔里木盆地塔中1井藻纹层白云岩与竹叶状白云岩成因——基于岩石学、元素与同位素地球化学的厘定[J].地质学报,2008,82(6):826-834.
- [13]王茂林,周进高,陈冬霞,等.白云石成因模式的研究进展及其适用性探讨[J].海相油气地质,2013,18(2):31-40.
- [14]Kaczmarek SE,Sibley DF.Direct physical evidence of dolomite recrystallization[J].Sedimentology,2015,61(6):1862-1882.
- [15]Kaczmarek S E,Thornton B P.The effect of temperature on stoichiometry,cation ordering, and reaction rate in high-temperature dolomitization experiments[J].Chemical Geology,2017,468(30):32-41.
- [16]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,2008,20(5):613-622.
- [17]张杰,寿建峰,张天付,等.白云石成因研究新方法——白云石晶体结构分析[J].沉积学报,2014,32(3):550-559.
- [18]李胜荣,许虹,申俊峰.结晶学与矿物学[M].地质出版社,2008.
- [19]Friedman GM, Sanders JE.Chapter 6 Origin and Occurrence of Dolostones[J].Elsevier Science & Technology,1967(94):267-348.
- [20]Land LS.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.
- [21]Reeder RJ. Constraints on Cation Order in Calcium-rich Sedimentary Dolomite[J].Aquatic Geochemistry,2000,6(2):213-226.
- [22]Kaczmarek SE,Sibley DF.A Comparison of Nanometer-Scale Growth and Dissolution Features on Natural and Synthetic Dolomite Crystals: Implications for the Origin of Dolomite[J].Journal of Sedimentary Research,2007,77(5-6):424-432..
- [23]朱筱敏.沉积岩石学[M].4版.石油工业出版社,2008.
- [24]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.
- [25]胡忠贵,郑荣才,文华国,等.川东邻水-渝北地区石炭系黄龙组白云岩成因[J].岩石学报,2008,24(6):1369-1378.

- [26]陈永权,周新源,赵葵东,等.塔里木盆地塔中1井藻纹层白云岩与竹叶状白云岩成因——基于岩石学、元素与同位素地球化学的厘定[J].地质学报,2008,82(6):826-834.
- [27]Geske A,Zorlu J,Richter D K,et al.Impact of diagenesis and low grade metamorphosis on isotope($\delta^{26}\text{Mg}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)and elemental(Ca, Mg, Mn, Fe and Sr)signatures of Triassic sabkha dolomites[J].Chemical Geology, 2012(332-333):45-64.
- [28]Badiozamani K.The Dorag dolomitization model-application to the middle Ordovician of Wisconsin[J].Jour.sediment.petro,1990, 43(4):965-984.
- [29]Luczaj JA.Evidence against the Dorag(Mixing-Zone)model for dolomitization along the Wisconsin arch A case for hydrothermal diagenesis[J].Aapg Bulletin, 2006,90(90):1719-1738.
- [30]刘建清,杨平,陈文彬,等.羌塘盆地中央隆起带南侧隆额尼一昂达尔错布曲组古油藏白云岩特征及成因机制[J].地学前缘,2010,17(1):311-321.
- [31]田永净,马永生,刘波,等.川东北元坝气田长兴组白云岩成因研究[J].岩石学报,2014,30(9):2766-2776.
- [32]Kaufman J.Numerical models of fluid flow in carbonate platforms:Implications for dolomitization[J].Journal of Sedimentary Research,1994,64(1):128-139.
- [33]伊海生,陈志勇,季长军,等.羌塘盆地南部地区布曲组砂糖状白云岩埋藏成因的新证据[J].岩石学报,2014,30(3):737-746.
- [34]Allan J R,Wiggins W D. Dolomite Reservoirs: Geochemical Techniques for Evaluating Origin and Distribution[J].Journal of Petroleum Science & Engineering,1993,14(s3-4):262-263.
- [35]王丹,陈代钊,杨长春,等.埋藏环境白云石结构类型[J].沉积学报,2010,28(1):17-25.
- [36]Zhang L,Jiao Y,Rong H,et al.Origins and Geochemistry of Oolitic Dolomite of the Feixianguan Formation from the Yudongzi Outcrop,Northwest Sichuan Basin,China[J].Minerals,2017,7(7):120.
- [37]吴仕强,朱井泉,王国学,等.塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩结构构造类型及其形成机理[A].中国科学院地质与地球物理研究所2008学术论文汇编[C].2009:1390-1400.
- [38]Zhu S,Yue H,Zhu X,et al.Dolomitization of felsic volcanoclastic rocks in continental strata:A study from the Lower Cretaceous of the A'nan Sag in Er'lian Basin,China[J].Sedimentary Geology,2017,353(4):13-27.
- [39]张杰,Brian Jones,张建勇,不同埋藏深度交代白云石晶体结构及其对白云岩储层研究的意义[J].中国石油勘探,2014,19(3):21-28.
- [40]Gregg JM,Bish D L,Kaczmarek S E,et al.Mineralogy,nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment:A review[J].Sedimentology,2015, 62(6):1749-1769.
- [41]姜楠,范凌霄,刘卉,等.普光气田滩相储层特征及白云化成因[J].天然气地球科学,2013,24(5):923-930.
- [42]钟倩倩,黄思静,邹明亮,等.碳酸盐岩中白云石有序度的控制因素——来自塔河下古生界和川东北三叠系的研究[J].岩性油气藏,2009,21(3):50-55.
- [43]杨虎,石堃,刘佳玮.鄂尔多斯奥陶系白云岩岩相学及其碳、氧稳定同位素特征[J].西北大学学报:自然科学版,2016,46(3):415-422.
- [44]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):1010-1020.
- [45]Monteshernandez G,Findling N,Renard F, et al.Precipitation of Ordered Dolomite via Simultaneous Dissolution of Calcite and Magnesite: New Experimental Insights into an Old Precipitation Enigma[J].Crystal Growth & Design,2014,14(14):671-677.
- [46]王文勇,黄文辉,唐鑫萍.沾化凹陷邵54井湖相白云岩沉积特征分析[J].石油天然气学报,2012,34(6):17-20.