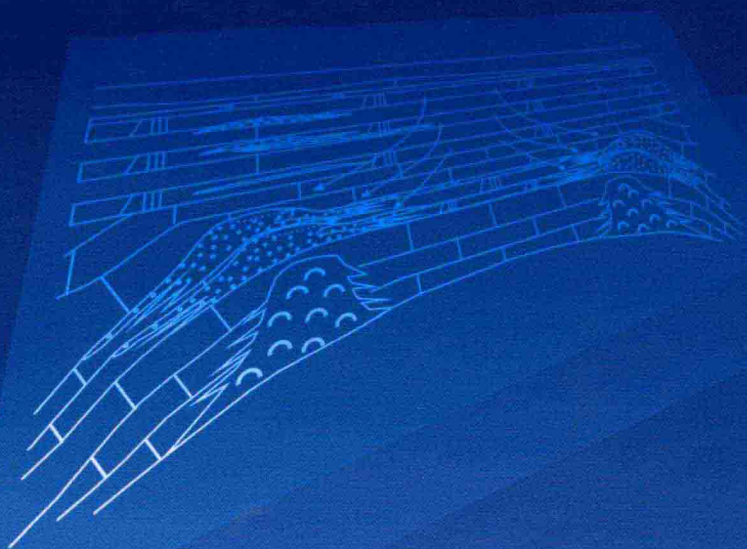


川东北地区三叠系

胡作维

黄思静

著



地质出版社

成都理工大学“中青年骨干教师培养计划”资助出版

川东北地区三叠系飞仙关组 白云岩的形成机制

**Dolomitization of the Triassic Feixianguan Formation,
Northeastern Sichuan Basin**

胡作维 黄思静 著



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以川东北地区三叠系飞仙关组白云岩为研究对象,以翔实的微观结构、地球化学、包裹体分析为依据,并结合前人的研究成果,详细描述了主要涉及的钻井和剖面,系统研究了白云岩和过渡岩石的岩石学特征及其时空分布特征、地球化学特征,反演推断了白云化流体的温度,深入讨论了白云化流体的来源,最后归纳总结了不同白云岩(白云石)类型对应的白云化系统与白云化机制。

本书可作为高等院校、科研单位地质类相关专业的教学科研参考用书,也可供从事油气和矿产地质勘探的地质工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

川东北地区三叠系飞仙关组白云岩的形成机制 / 胡作维等著. —北京:地质出版社, 2013. 2

ISBN 978 - 7 - 116 - 08111 - 6

I. ①川… II. ①胡… III. ①三叠纪—白云岩—形成机制—研究—川东地区 IV. ①P588. 24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 319678 号

CHUANDONGBEI DIQU SANDIEXI FEIXIANGUANZU BAIYUNYAN DE XINGCHENGJIZHI

责任编辑:罗军燕 祁向雷

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324514 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82324340

印 刷:北京长宁印刷有限公司

开 本:787mm × 1092mm 1/16

印 张:9.5 图 版:4 面

字 数:250 千字

版 次:2013 年 2 月北京第 1 版

印 次:2013 年 2 月北京第 1 次印刷

定 价:35.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 08111 - 6

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

川东北地区三叠系飞仙关组天然气储量规模之大,深埋藏条件下储层质量之好,在国内外海相碳酸盐岩地层中十分罕见。目前,川东北地区三叠系飞仙关组天然气的勘探离不开对白云岩的勘探,只要找到这些代表优质储集岩的优势岩相——白云岩,天然气勘探就有希望获得大的突破。近年来,川东北地区三叠系飞仙关组碳酸盐岩白云化作用并最终形成优质储层的成岩机制已经成为人们最为关注的热点研究领域之一。然而,在目前川东北地区三叠系飞仙关组白云岩,尤其是优质储层白云岩研究中仍有很多问题没有得到圆满解决,诸如白云化流体性质、白云化流体来源、白云化作用发生时间、白云化作用机制等,甚至对同一个问题的理解也不可避免地存有争议,还没有一个已有模式可以圆满解释川东北地区三叠系飞仙关组优质储层白云岩的成因。

目前川东北地区三叠系飞仙关组白云岩研究工作虽多,但与之有关的专著还十分少见,尤其是关于川东北地区三叠系飞仙关组碳酸盐岩白云化作用并最终形成优质储层的成岩机制等方面。本书选题来源于国家自然科学基金项目(No. 40839908, No. 40672072)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(No. 20050616005),以川东北地区三叠系飞仙关组白云岩为研究对象,以翔实的微观结构、地球化学、包裹体分析为依据,并结合前人的研究成果,系统研究了川东北地区三叠系飞仙关组白云岩(尤其是优质储层白云岩)的形成机制问题。全书主要由七部分组成:第一章简述了当前白云化作用模式、四川盆地白云岩等研究进展以及本书的选题依据、研究意义、研究内容与技术路线;第二章简述了川东北地区地层、构造与沉积演化等区域地质背景以及本书主要涉及的钻井和剖面;第三章详细描述了白云岩、过渡岩石类型的主要岩石学特征及其时空分布特征;第四章系统研究了白云岩及相关岩石的地球化学特征(包括代表同期海水的灰岩地球化学特征);第五章反演推断了白云岩形成过程中白云化流体的温度;第六章深入讨论了白云岩形成过程中白云化流体的来源;第七章归纳总结了不同白云化系统的白云化过程及其地球化学特征差异以及不同白云岩(白云石)类型对应的白云化系统与白云化机制。

值得注意的是,自1791年法国博物学家Dolomieu首次详细描述白云石以来,白云石(白云岩)的成因问题一直是地质学领域的一个未解之谜,200多年以来没有哪一种

观点可以真正完全解决白云石（白云岩）的成因问题，不管是在国外还是在国内，与白云石（白云岩）有关的问题讨论都不可避免地存有争议和不确定性；同时，由于本研究获得的资料和数据仍然有限且对前人大量研究成果消化吸收不够，使得本书的一些观点和认识同样不可避免地存有主观性和片面性，但本书无意（也无法）彻底解决川东北地区三叠系飞仙关组白云岩，尤其是优质储层白云岩研究中的所有问题，本书的目的并不是问题讨论的终点，而只是问题讨论的一个探索。若本书能起到抛砖引玉的作用，激发大家进一步深入研究川东北地区三叠系飞仙关组白云岩成因问题的热情，就已经达到了本书出版的初衷。

国家自然科学基金、教育部高等学校博士学科点专项科研基金、成都理工大学研究生院“优秀博士培养计划”资助了研究经费，成都理工大学人事处“中青年骨干教师培养计划”资助了出版经费；同时，第一作者多年来始终得到了成都理工大学沉积地质研究院、能源学院各位领导和老师的关心、帮助和鼓励，尤其恩师黄思静教授多年来对第一作者的培养与指导，第一作者向前迈进的每一小步都凝聚着恩师的心血；中国石化勘探开发研究院无锡石油地质研究所李志明高级工程师、范明高级工程师、徐二社工程师和张文涛工程师、中国科学院地质与地球物理研究所蔡春芳研究员在野外和室内研究中给予了大力帮助和重要启发；成都理工大学沉积地质研究院李云博士在文献查阅和文字校对中做了大量工作，并提出了许多宝贵建议，在此一并表示衷心感谢。

由于水平有限和时间仓促，书中不对和遗漏之处在所难免，恳请各位专家、学者、读者谅解和指正。

作 者

于成都理工大学沉积地质研究院

2012 年 7 月

目 录

第 1 章 绪 言	(1)
1.1 白云化作用模式研究进展	(1)
1.1.1 近地表 (浅埋藏) 白云化作用模式	(2)
1.1.2 中-深埋藏白云化作用模式	(6)
1.1.3 热液白云化作用模式	(10)
1.1.4 微生物白云化作用模式	(11)
1.1.5 小结	(12)
1.2 四川盆地白云岩研究进展	(13)
1.2.1 前寒武系和下古生界白云岩	(16)
1.2.2 上古生界白云岩	(16)
1.2.3 三叠系白云岩	(17)
1.3 选题依据与研究意义	(18)
1.3.1 选题依据	(18)
1.3.2 研究意义	(19)
1.4 研究内容与技术路线	(19)
第 2 章 区域地质背景	(21)
2.1 三叠系地层简述	(22)
2.1.1 飞仙关组	(22)
2.1.2 嘉陵江组	(23)
2.1.3 雷口坡组	(23)
2.1.4 须家河组	(23)
2.2 构造与沉积演化简述	(25)
2.2.1 四川盆地构造与沉积演化	(25)
2.2.2 川东北地区飞仙关期构造与沉积演化	(26)
2.3 主要涉及的钻井和剖面	(28)

第 3 章 白云岩及相关岩石的岩石学特征	(30)
3.1 白云岩分类方案	(30)
3.2 白云岩主要类型	(31)
3.2.1 微晶白云岩	(31)
3.2.2 粒屑白云岩	(31)
3.2.3 结晶白云岩	(32)
3.2.4 成分上过渡的岩石类型	(33)
3.3 不同白云岩类型的分布特征	(34)
3.3.1 时间(层组)分布特征	(34)
3.3.2 空间(区域)分布特征	(36)
第 4 章 白云岩及相关岩石的地球化学特征	(38)
4.1 分析方法与分析数据	(38)
4.2 灰岩的地球化学特征	(45)
4.2.1 碳酸盐矿物和微量元素组成	(45)
4.2.2 同位素组成	(50)
4.3 白云岩的地球化学特征	(57)
4.3.1 碳酸盐矿物和微量元素组成	(57)
4.3.2 同位素组成	(61)
第 5 章 白云化流体的温度	(65)
5.1 区域埋藏史与热史	(65)
5.1.1 埋藏史	(65)
5.1.2 热史	(67)
5.2 流体包裹体温度计	(68)
5.2.1 白云石中流体包裹体	(68)
5.2.2 方解石中流体包裹体	(70)
5.2.3 小结	(71)
5.3 氧同位素温度计	(71)
5.3.1 基本原理与方法	(72)
5.3.2 计算结果	(72)
5.3.3 小结	(86)

第 6 章 白云化流体的来源	(88)
6.1 Ca/Mg 比	(88)
6.1.1 基本原理	(88)
6.1.2 计算结果	(89)
6.2 流体包裹体盐度	(91)
6.3 微量元素	(94)
6.3.1 Mn、Fe 元素	(94)
6.3.2 Sr 元素	(97)
6.4 碳、氧同位素	(99)
6.4.1 碳同位素	(99)
6.4.2 氧同位素	(102)
6.5 锶同位素	(106)
第 7 章 白云化系统与白云化机制	(112)
7.1 白云化系统	(112)
7.1.1 不同白云化系统的白云化过程	(112)
7.1.2 不同白云化系统的地球化学特征差异	(113)
7.2 白云化机制与模式	(115)
7.2.1 白云化机制	(115)
7.2.2 白云化作用模式	(118)
主要认识	(124)
Abstract	(126)
参考文献	(128)
图版说明及图版	(143)

第1章 绪 言

1.1 白云化作用模式研究进展

自 1791 年法国博物学家 Dolomieu 首次详细描述白云石以来 (Dolomieu, 1791), 地质学家们都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)”这个独具魅力的领域。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, 同时在地表温度下没有细菌的媒介作用参与, 实验室人工合成几乎不可能沉淀出白云石 (Warren, 2000), 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“白云石问题 (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 (Alderman et al., 1957), 其 Ca、Mg 成分范围在 $\text{Ca}_{50}\text{Mg}_{50}$ 到 $\text{Ca}_{56}\text{Mg}_{44}$ 之间, 但其中绝大多数不具超结构 (Von der Borch, 1976), 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 (Botz et al., 1984), 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、北美地区接近 80% 的油气碳酸盐岩储层都是白云岩储层 (Zenger et al., 1980), 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 (Warren, 1999), 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, 全书同), 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, 总结了一系列不同的白云化作用模式来解释白云岩的成因 (Zenger et al., 1980; Warren, 2000; Machel, 2004)。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, 并导致了白云化作用模式的多样性。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。本书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:

- ◎近地表（浅埋藏）白云化作用模式，如：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，如：压实驱动模式、构造挤压模式、地形补给模式、热对流模式；
- ◎可深可浅的白云化作用模式，即一些白云化作用的可能发生深度不确定，如：热液白云化作用模式和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（王勇，2006；张学丰等，2006；赫云兰等，2010），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。

1.1.1 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 1.1）。

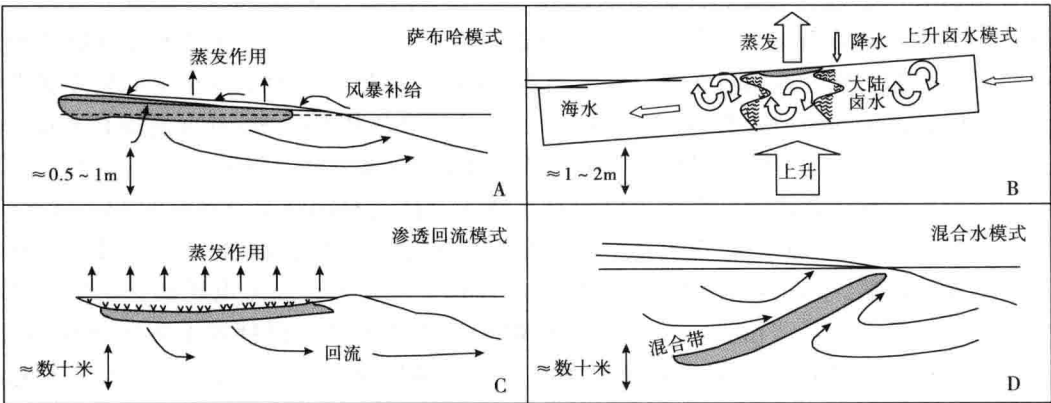


图 1.1 近地表（浅埋藏）白云化作用模式图

图 A、C、D 据 Warren (2000)；图 B 据 Wood et al. (2002)，略有修改；阴影部分为白云石可能形成区域

(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 (Warren, 2000)，萨布哈模式的标准地点是阿联酋阿布扎比 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，也是丰富的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 (Machel, 2004)。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 1.1），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 1.1A）。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 (Wenk et al. , 1993)。

表 1.1 不同碳酸盐白云化作用模式的一些特征

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	< 600m?	孔隙	海水或大陆卤水	孔隙水
	渗透回流模式			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	> 600m?	孔隙 或 断裂	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			穿越地层大气淡水	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

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 et al. (2002) 通过对同位素地球化学、溶质成分、溶质和水通量的分析，认为大于 95% 的溶质是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，从早期的毛细管力 (Friedman et al. , 1967)、海水洪泛 (Kinsman, 1969)、蒸发泵吸 (Hsü et al. , 1973)，到后来的两个或多个上述过程的组合，如洪水补给—蒸发泵吸 (Müller et al. , 1990)，McKenzie et al. (1980) 也认为萨布哈的水文循环经历了三个连续阶段：风暴驱动海水洪泛、毛细管蒸发和蒸发泵吸，Wood et al. (2002) 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 1.1B)。同时，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 (Friedman et al. , 1967; Hsü et al. , 1973)，被替换的 Ca²⁺ 进入到孔隙水中 (表 1.1)；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 (Wenk et al. , 1993; Sadooni et al. , 2010)，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 (Wenk et al. , 1993)。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的联系 (Bontognali et al. , 2010)，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 (Machel, 2004)。

(2) 渗透回流模式

渗透回流模式是 Adams et al. (1960) 在解释美国得克萨斯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 Mg^{2+} 卤水(表 1.1),卤水浓度不断升高、密度也相应不断增大(可以达到 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$);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 1.1C),被替换的 Ca^{2+} 也随之回到广海(表 1.1)。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 Mg^{2+} 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(Shields et al., 1995; Potma et al., 2001)。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(Shields et al., 1995; Jones et al., 2003, 2004; Whitaker et al., 2004)。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(Müller et al., 1971)、哥伦比亚 San Andres 海岸线(Kocurko, 1979)、约旦 Aqaba 湾 Solar 湖(Aharon et al., 1977)、埃及 Sinai 半岛 Ras Mohammed 海岸现代边缘(Warren, 1991)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(Deffeyes et al., 1965),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(Lucia, 1968),相应的潟湖水文循环机制也与原来料想的基本相反:一层渗透性较低的薄层粘土火山灰层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(Murray, 1969; Fouke et al., 1996)。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 $\text{Ca}^{2+} < \text{SO}_4^{2-}$ 或 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-}$ 决定了蒸发浓缩后流体的 Mg/Ca 比值变化,只有 $\text{Ca}^{2+} < \text{SO}_4^{2-}$ 的水体才会满足 Mg/Ca 比值较快增加的需要(Warren, 2000)。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 et al. (1960) 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(Warren, 2000),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(Shields et al., 1995; Jones et al., 2003),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(Jones et al., 2003, 2004),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（Jones et al., 2003, 2004），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（Machel et al., 1996），因而渗流通道的连续性和高效性及其控制机制也是人们应该关心的。事实上，渗透回流白云化作用往往需要较长时间的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 et al. (2003) 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。

（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（Friedman, 1980），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 et al. (1971) 率先使用混合水（包括 Mixing zone、Dorag，全文同）模式解释美国佛罗里达古新世—早中新世灰岩含水层中白云石的成因，Land (1973) 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 (1973) 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，在具有这些比例的混合水的出现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美国威斯康星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 1.1D）。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 1.1）。

从混合水模式建立的早期，已有较多学者对大气淡水—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很多质疑（Hardie, 1987; Machel et al., 1994）。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（Hardie, 1987），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 白云岩（Machel et al., 1994）和牙买加北部新近系 Hope Gate 组白云岩（Land, 1991）。Machel (2004) 从热力学、动力学和水文学三个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，即使文石已经处于不饱和状态（Melim et al., 2004）；随后，Luczaj (2006) 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，彻底否认了美国威斯康星中奥陶统白云岩是 Badiozamani (1973) 原先认为的混合水成因，并认为它们是热液白云化作用的结果。值得注意的是，尽管对混合水模式质疑的声音此起彼伏，但 Machel (2004) 并没有完全否定海水—淡水混合带中可以形成白云石，只是认为海水—淡水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，且仅限于台地边缘分布；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（体积分数只有百分之几），且作为薄的胶结边或交代边出现。

1.1.2 中－深埋藏白云化作用模式

随着沉积物或沉积岩的埋深持续增加，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）环境中与中－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 500m（Müller, 1967）、≈ 600m（Galloway et al., 1983）、> 600 ~ 1500m（Machel, 1999, 2005）。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 1.2）。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：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。

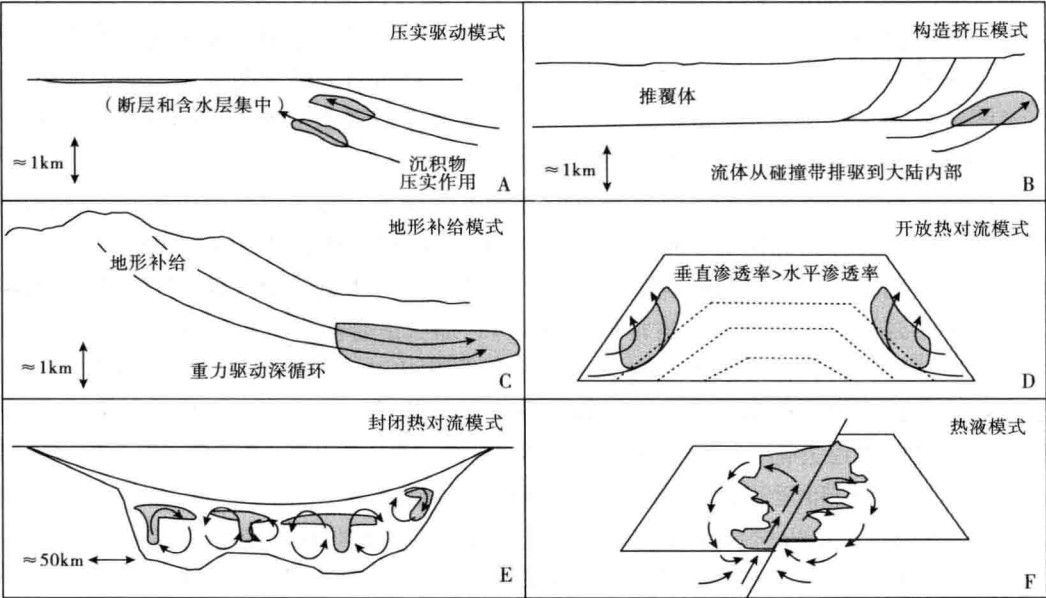


图 1.2 中－深埋藏、热液白云化作用模式图
图 A、B、C 据 Warren (2000)；图 D、E、F 据 Machel (2004)；阴影部分为白云石可能形成区域

(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（Illing, 1959），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

• 6 •

Mg^{2+} 压实流体（主要是一些与海水有关的富 Mg^{2+} 海源流体；表 1.1）进入到邻近渗透性较好的灰岩、并将其白云化（图 1.2A），被替换的 Ca^{2+} 进入到地下水中（表 1.1）。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（Machel, 2004）。此外，压实驱动模式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（Garven et al., 1984），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人们一般认识的要更为普遍，有关实例如美国密歇根志留系生物礁（Jodry, 1969）、加拿大艾伯塔上泥盆统 Rimbey - Meadowbrook 生物礁带（Machel et al., 1989; Machel, 2004）等，尤其是已有大量资料支持后者与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有关（Mountjoy et al., 1999）。

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（Magara, 1978），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所需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以供应足够的 Mg^{2+} ，Morrow (1982) 通过计算认为 1 立方厘米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 et al. (1987) 也通过质量平衡计算认为美国密歇根盆地中来自粘土的 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 et al. (2010) 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，而且经受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。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因素。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）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 1.2B），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 1.1）；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 (Oliver, 1986)。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 (Morrow, 1998)。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,如美国志留系—泥盆系 Helderberg 群 (Dorobek, 1989)、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 (Montanez, 1994)、加拿大西部上泥盆统 Leduc 组生物礁 (Drivet et al., 1997) 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 (Garven, 1995),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 (Deming et al., 1990),随后的成岩研究也证实了这一点 (Buschkuehle et al., 2002),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 (Machel, 2004)。目前构造挤压模式仅仅是一个理想化的简单模型,实际情况并非人们以前想象的那么简单,复杂的构造背景是人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,不同的机制可能产生不同的影响,包括正面或负面的影响。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、主要作用规模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。

(3) 地形补给模式

地形补给模式由 Garven et al. (1984) 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 1.2C)。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淡水的补给环境下,就有可能发生地形补给驱动流 (Toth, 1988; Garven, 1995),高地势的地表大气淡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,地形可以驱动数量庞大的大气淡水通过沉积盆地,并在大气淡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淡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,且可通过含水层优先聚集 (Morrow, 1998);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 1.1)。然而,要发生体积上有意义的白云化作用需要大气淡水在接触被白云化的灰岩之前的流经通道中溶解足够的 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 (Machel, 2004),因而目前还没有通过地形补给模式发生广泛白云化作用的实例被证实,但美国密苏里寒武系碳酸盐岩 (Gregg, 1985)、加拿大南部落基山脉寒武系—奥陶系碳酸盐岩 (Yao et al., 1995) 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具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?这些问题是地形补给模式今后需要进一步完善的方面。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人们并不了解的地方。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。

(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流体的自由对流 (Garven, 1995)。热对流的原始驱动力来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的改变。地层温度的变化可能是由以下原因造成的: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)(Jones et al., 2004)、温暖台地海水与寒冷大洋海水之间的横向温度差异(Kohout et al., 1977)或者火成岩侵入体周边地区热通量的升高(Wilson et al., 1990),同时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(Morrow, 1998)。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、封闭型和混合型三种类型(Raffensberger et al., 1999),其中开放热对流单元主要形成于碳酸盐台地上,在其顶部或侧向对海水开放,并使得海水可以补充或流出(图 1.2D),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 1.1);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 1.2E),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 1.1);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的(Raffensberger et al., 1999)。

在目前实际应用中,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(Morrow et al., 1990)、加拿大安大略密歇根盆地奥陶系产气白云岩(Coniglio et al., 1994)等,但也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(Amthor et al., 1993),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(Morrow, 1998)。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可以通过热对流模式实现大规模的白云化作用(Jones et al., 2003, 2004; Whitaker et al., 2004),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