

深埋藏滩相 白云岩储层形成机理

——以川中地区下寒武统龙王庙组为例



Reservoir Forming-Mechanism
of Deep Burial Dolomite Within Shoal Facies:
A Case From Lower Cambrian Longwangmiao
Formation, Middle Sichuan Basin, SW China

杨雪飞 王兴志 杨跃明 文 龙 / 著



科学出版社

深埋藏滩相白云岩储层形成机理

——以川中地区下寒武统龙王庙组为例

杨雪飞 王兴志 杨跃明 文龙 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书利用钻井、测井、岩芯、分析化验等资料,对川中地区下寒武统龙王庙组开展详细的地层和沉积相研究,建立研究区沉积相模式及滩体演化模式;结合铸体薄片、压汞、CT扫描等研究手段将龙王庙组储层进行分类;通过岩相和地球化学分析,探讨了白云岩化作用对储层孔隙形成的影响;结合区域构造演化史,通过地震、测井、岩芯、地化分析等研究手段对龙王庙组表生期岩溶作用的发育证据、特征、形成机理以及对储层孔洞形成的影响进行了探讨,并建立研究区顺层岩溶模式;结合上述研究,最终探讨控制龙王庙组储层发育的各种因素,总结储层形成机理并建立了储层成因演化模式。

本书适用于各大油田从事油气田勘探的工程师、各科研院所进行油气储层研究的工作人员,以及大专院校石油地质学专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

深埋藏滩相白云岩储层形成机理:以川中地区下寒武统龙王庙组为例 / 杨雪飞等著. — 北京:科学出版社, 2016.5

ISBN 978-7-03-048306-5

I. ①深… II. ①杨… III. ①四川盆地-油气勘探-白云岩-成岩作用-成藏模式 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 104914 号

责任编辑:杨 岭 罗 莉 / 责任校对:陈 杰 邓丽娜

责任印制:余少力 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:243千字

定价:119.00元

前 言

川中地区下寒武统龙王庙组是近年来我国海相碳酸盐岩油气勘探领域取得的最大突破，也是四川盆地下古生界新发现的一套重要的含气层。长期以来，国内对龙王庙组的研究相对薄弱，认识较浅，直到 2012 年川中磨溪区块龙王庙组取得突破后才引起油气勘探家的研究兴趣。然而，当前对龙王庙组的研究多集中在天然气成藏方面，关于龙王庙组储层的研究较少并且多停留在储层特征的静态描述上，缺少对其形成机理和动态演化的深入研究。

本书针对川中地区下寒武统龙王庙组白云岩储层的基本特征以及储层形成机理等问题，以岩相学、沉积学、储层地质学等学科理论为指导，在分析四川盆地下寒武统龙王庙组沉积背景和构造背景的基础上，利用钻井、测井、岩芯、分析化验等资料，对川中地区下寒武统龙王庙组开展详细的地层和沉积相研究，建立研究区龙王庙组沉积相模式及滩体演化模式；结合铸体薄片、压汞、CT 扫描等研究手段对龙王庙组储层基本特征进行详细描述，并根据储集空间类型将龙王庙组储层进行分类；根据对储层孔隙产生的影响不同将龙王庙组成岩作用划分为建设性成岩作用和破坏性成岩作用，并建立成岩序列；通过岩相和地球化学分析，对龙王庙组白云岩基岩和充填物白云石分别进行成因分析，并探讨白云岩化作用对储层孔隙形成的影响；结合区域构造演化史，尤其是乐山—龙女寺古隆起的演化，通过地震、测井、岩芯、地化分析等研究手段对龙王庙组表生期岩溶作用的发育证据、特征、形成机理以及对储层孔洞形成的影响进行探讨，并建立研究区龙王庙组顺层岩溶模式。结合上述研究，本书最终探讨了控制龙王庙组储层发育的各种因素，总结了储层形成机理并建立了储层成因演化模式。通过研究取得了如下几点成果和新认识。

(1) 川中地区龙王庙组顶底界线清晰，可划分为上、下两个亚段，分别对应两个完整的四级海侵—海退旋回。受控于早寒武世的古地理格局和古气候背景，研究区以发育蒸发—局限台地沉积为主，进一步可细分出潟湖、台内滩、碳酸盐潮坪和混积潮坪四个亚相及若干微相，其中以台内滩的滩核微相储集性能最优。龙王庙组沉积相展布受沉积期水下古隆起影响较大，台内滩常绕古隆起呈环带状分布，成为绕隆起边缘滩。

(2) 龙王庙组储集岩类多为颗粒白云岩、粉—细晶白云岩，储集空间以粒间溶孔、晶间溶孔和溶洞为主，并发育孔隙型、花斑孔洞型、溶洞型以及裂缝(复合)型四类储层，其中以花斑孔洞型分布最为广泛。储层在演化过程中主要经历了压实压溶、胶结充填、重结晶、白云岩化及多期溶蚀等成岩作用的改造，最终形成了现今的储集面貌。

(3) 岩相学和地球化学证据表明：研究区龙王庙组白云岩形成时间早，白云岩的成因与沉积期高频海平面变化引起的中等盐度海水向下淹没和回流有关，为中等盐度海水渗透回流白云岩化作用。龙王庙组白云岩分布广、厚度大，是储层形成的物质基础，通过研究白云岩化与孔隙成因的关系认为：开放体系下发生的等体积交代白云岩化虽未直接

产生大量的孔隙，但形成的晶间隙改善了储层的渗流性能，为后期酸性流体的溶蚀改造提供了优质的通道基础。

(4)寒武系沉积后，加里东晚幕广西运动导致四川盆地整体发生抬升，川西地区龙王庙组地层直接暴露地表并遭受剥蚀，而川中大部分地区龙王庙组地层则被抬升至近地表环境。在长时间的表生岩溶过程中，大气淡水自研究区西边的岩溶古潜山(龙王庙组剥蚀窗)进入川中龙王庙组地层，受上下隔水层的阻隔影响，龙王庙组成为承压深潜流带，流体在压力作用下顺地层运移并对岩石进行溶蚀，产生了大量顺层分布的溶蚀孔洞。(承压)顺层岩溶作用是现今龙王庙组储层溶蚀孔洞形成的主要机制。

(5)多期溶蚀作用的叠加改造形成了现今溶蚀孔洞的形态。早期大气淡水淋滤作用产生的孔隙很难保存至今，但其存在为后期溶蚀流体提供了运移通道。有机质热演化过程中，干酪根释放的有机酸对岩石进行溶蚀并产生部分孔隙，但液态烃充注后，石油热裂解形成的沥青将堵塞孔隙，裂解过程中将进一步释放有机酸并对先期孔隙进行溶蚀扩大。有机酸埋藏溶蚀作用由于其发生在相对封闭的环境，溶解—沉淀最终将达到平衡，虽未直接产生新的孔隙增量，但优化和调整了先期孔洞。因而，有机酸埋藏溶蚀作用是龙王庙组溶蚀孔洞得以保存至今的主要机制。

(6)有利沉积相带为龙王庙组储层发育奠定了良好的物质基础，尤其是沉积期乐山—龙女寺水下古隆起控制了有利相带的展布，进而控制了储层的平面发育。成岩改造是储层形成的关键因素，其中白云岩化形成的厚层白云岩为后期溶蚀提供了良好的条件；表生期顺层岩溶作用则是储层次生孔洞主要形成机制；有机酸埋藏溶蚀则是对先前孔洞主要的保存机制。构造运动产生的断裂进一步提高了储层的储渗性能。结合对储层主控因素的研究，恢复了龙王庙组储层的动态演化过程，建立了储层成因模式。在此基础上，本书对龙王庙组储层有利发育区进行了分析，指出乐山—龙女寺古隆起通过“控相控溶”最终控制了现今龙王庙组优质储层的分布。

由于作者水平有限，错误和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2016年2月于成都

目 录

第1章 引 言	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 碳酸盐岩储层研究	3
1.2.2 白云岩化作用研究	5
1.2.3 碳酸盐岩岩溶作用研究	7
1.3 主要研究内容和思路	10
1.3.1 研究内容	10
1.3.2 研究思路及技术路线	11
1.4 研究成果及亮点	12
第2章 区域地质概况	13
2.1 区域位置及范围	13
2.2 区域构造特征	14
2.2.1 区域构造旋回	14
2.2.2 乐山—龙女寺古隆起演化	17
2.3 勘探开发概况	20
2.3.1 勘探概况	20
2.3.2 开发概况	21
2.4 地层特征	22
2.4.1 区域地层概况	22
2.4.2 地层界限	24
2.4.3 地层划分与对比	26
2.4.4 地层展布	33
第3章 沉积相特征	36
3.1 区域沉积背景	36
3.2 沉积相类型与特征	38
3.2.1 混积潮坪	38
3.2.2 碳酸盐潮坪	42
3.2.3 台内滩(水下古隆起边缘滩)	43
3.2.4 泻湖	49
3.3 沉积相分布	52
3.3.1 纵向分布	52
3.3.2 横向分布	54

3.3.3 平面分布	59
3.4 沉积相模式与演化	62
第4章 储层特征	65
4.1 岩石学特征	65
4.1.1 颗粒白云岩	65
4.1.2 晶粒白云岩	70
4.1.3 其他非储集岩类	72
4.2 储集空间类型	75
4.2.1 孔隙	75
4.2.2 溶洞	80
4.2.3 裂缝	82
4.3 储层物性特征	83
4.3.1 孔隙度	83
4.3.2 渗透率	84
4.3.3 孔渗关系	85
4.4 储层类型	85
4.4.1 孔隙型储层	86
4.4.2 花斑孔洞型储层	88
4.4.3 溶洞型储层	90
4.4.4 裂缝(复合)型储层	91
4.5 储层分布	91
4.5.1 纵向分布	91
4.5.2 横向分布	92
4.5.3 平面分布	95
第5章 储层成岩作用	98
5.1 成岩作用类型与特征	98
5.1.1 压实、压溶作用	99
5.1.2 胶结作用	100
5.1.3 充填作用	101
5.1.4 重结晶作用	103
5.1.5 白云岩化作用	105
5.1.6 溶蚀作用	105
5.2 储层成岩序列	105
第6章 白云岩成因机理	107
6.1 白云岩(石)特征	107
6.1.1 基质白云岩	107
6.1.2 充填白云石	110
6.2 地球化学特征	111
6.2.1 微量元素	112

6.2.2 碳、氧同位素 115

6.2.3 海水盐度和温度计算 116

6.2.4 包裹体温度 117

6.3 白云岩沉积序列 119

6.4 白云岩平面分布 119

6.5 白云岩成因机理 120

6.6 白云岩化与孔隙成因关系 124

第7章 储层溶蚀机理 127

7.1 同生—准同生期大气淡水溶蚀作用 127

7.2 表生期岩溶作用 128

7.2.1 岩溶作用依据 128

7.2.2 岩溶古地貌 133

7.2.3 岩溶发育特征 135

7.2.4 承压顺层岩溶机制 137

7.2.5 岩溶发育模式 139

7.2.6 顺层岩溶与储层发育的关系 139

7.3 埋藏期有机酸溶蚀作用 140

7.3.1 有机酸溶蚀成因 142

7.3.2 有机酸溶蚀与储层孔隙的关系 142

第8章 储层主控因素及形成机理 144

8.1 沉积作用奠定储层发育物质基础 144

8.1.1 储层发育受岩性直接控制 144

8.1.2 沉积期古隆起控制有利相带 145

8.1.3 沉积旋回控制储层纵向分布 146

8.2 成岩作用是储层形成的关键因素 148

8.2.1 白云岩化为后期溶蚀提供了良好条件 148

8.2.2 顺层岩溶是溶蚀孔洞形成的主要动力 148

8.2.3 埋藏溶蚀是溶蚀孔洞得以保存的关键 150

8.3 构造作用对储层的优化和改造 150

8.4 储层形成机理与演化模式 150

8.4.1 储层形成机理 150

8.4.2 储层成因演化模式 151

参考文献 154

第 1 章 引 言

1.1 研究意义

在全球的油气勘探中，海相碳酸盐岩占有极为重要的地位。据统计，全球约有 60% 的油气资源赋存在海相碳酸盐岩中，目前已在碳酸盐岩沉积盆地中发现了数百个大型油气田（表 1-1）（Roehl et al.，1985）。在中国，特别是南方地区海相碳酸盐岩分布广，总面积超过 $450\times 10^4\text{ km}^2$ ，其中分布有碳酸盐岩的陆域海相盆地有 28 个，面积约 $330\times 10^4\text{ km}^2$ ，海域海相盆地有 22 个，面积约 $125\times 10^4\text{ km}^2$ （周玉琦等，2002）。我国新一轮的油气资源评价表明，陆上海相碳酸盐岩油气资源丰富，其中石油地质资源量可达 $340\times 10^8\text{ t}$ ，天然气地质资源量可达 $24.3\times 10^{12}\text{ m}^3$ （李静，2007）。近十年来，我国在四川、塔里木、鄂尔多斯等陆上海相碳酸盐岩油气勘探领域取得了重大进展，仅在 2006~2010 年期间就累计新增探明石油 $6.5\times 10^8\text{ t}$ 、天然气 $6400\times 10^8\text{ m}^3$ ，总体储量规模较大（赵文智等，2012）。但目前整体上探明储量还较低（金之均，2005），仍具有较大的勘探潜力。

表 1-1 世界大型碳酸盐岩油气田基本情况表（据 Roehl et al.，1985）

国家或地区	油田名称	发育层位	储集岩性	探明储量
美国德克萨斯	Puckett	下奥陶统	白云岩	55 亿 桶
加拿大阿尔伯特	Rainbow	中泥盆统	灰岩、白云岩	79.3 亿 桶
新墨西哥 NM	Morton	下二叠统	灰岩	1.82 亿 桶
沙特阿拉伯	Qatif	上侏罗统	灰岩、白云岩	9 亿 桶
委内瑞拉	La Paz	下白垩统	灰岩	100 亿 桶
阿联酋	Fateh	中白垩统	灰岩	102 亿 桶
墨西哥	Poza Rica	中白垩统	灰岩、白云岩	120 亿 桶
巴西	Canpas	中白垩统	灰岩	63 亿 桶
美国德克萨斯	Fairway	上白垩统	灰岩	23 亿 桶
挪威	Ekofisk	上侏罗统	灰岩	120 亿 桶
伊朗	GachSaran	渐新一中新统	灰岩、白云岩	90 亿 桶
日本九州	Fukubezawa	中新统	白云岩	3.30 亿 桶

四川盆地位于我国西南部，其海相碳酸盐岩分布广、发育层位多、厚度大、天然气资源丰富。自 1964 年在威远地区发现震旦系气藏以来，先后在四川盆地北部长兴组—飞仙关组的环开江—梁平海槽两侧发现了普光、龙岗、元坝等储量规模在 $1000\times 10^8\text{ m}^3$ 以

上的大气田,在川中和川南的雷口坡组、嘉陵江组、震旦系灯影组等多套地层也均取得了油气勘探的突破。然而,随着四川盆地部分层位相继进入开采后期,已有探明储量不足,迫切需要寻找新的油气田和新的含油气层作为接替层位。四川盆地油气勘探也逐渐从浅层走向深层勘探,希望从深层碳酸盐岩中找到新的突破。

随着对四川盆地下组合地层油气勘探的不断深入,寒武系地层作为一套新的勘探层位,具有良好的油气勘探潜力。已有资料表明;盆地内下寒武统筇竹寺组烃源岩发育较好(戴鸿鸣等,1999;金之钧等,2006;李天生,1992;冉隆辉等,2006;肖开华等,2006),远景资源量在下古生界占首位(黄籍中等,1996);中—上寒武统碳酸盐岩分布广泛、厚度稳定,发育有良好的储集体(李伟等,2012),在盆地内,资阳及威远地区上寒武统洗象池群已取得一定的油气显示(李凌等,2013),但长期以来,下寒武统龙王庙组中的油气勘探一直未取得突破,相应的研究也基本处于空白。直至2012年,随着川中地区该层位的油气勘探取得重大突破,尤其是磨溪—高石梯地区陆续钻探的多口新井龙王庙组均取得日产天然气产量大于 $100\times 10^4\text{m}^3$ 的试油结果,使之成为盆地内继长兴组、飞仙关组后又一重要含油气层位,展现出巨大的勘探潜力。2013年,上报国土资源部“川中地区安岳气田磨溪区块下寒武统龙王庙组气藏”探明储量 $4403.85\times 10^8\text{m}^3$,这也是目前我国所发现的最大单体海相整装气藏,其发现标志着下寒武统龙王庙组成为了四川盆地一个全新的具有巨大经济价值的含气层。龙王庙组特大型天然气藏的问世不仅可以增加我国的能源供应,缓减经济快速发展对资源需求造成的迫切压力,同时,更激发起石油勘探学家们对龙王庙组浓厚的研究兴趣。

目前,对四川盆地下寒武统龙王庙组的研究主要集中在安岳气田磨溪区块,部分学者对龙王庙组气藏的储层特征进行了一定程度的研究,认为龙王庙组为滩相白云岩储层,储集岩性以砂屑白云岩和具残余砂屑结构的晶粒白云岩为主,储层发育良好,具有较好的横向对比和连片性。现有研究多认为龙王庙组储层与大规模发育的颗粒滩关系密切,受乐山—龙女寺水下古隆起影响较大(周进高等,2014;姚根顺等,2013;杜金虎等,2014;赵文智等,2014)。然而,随着勘探及研究的深入,龙王庙组表现出较大的非均质性,不单单是沉积相控制储层的分布,而且是在滩相沉积体基础上叠加岩溶改造形成的孔洞型储层(周进高等,2015;杨雪飞等,2015;金民东等,2014)。

龙王庙组白云岩(主要是颗粒白云岩)是安岳气田储层形成的物质基础,但前人尚未对这套分布广、厚度大的白云岩成因进行过详细的研究,多数学者将其笼统地归为蒸发泵和渗透回流白云岩化,认为与超咸水蒸发环境有关(周进高等,2015;杨雪飞等,2015;金民东等,2014;田艳红等,2014;刘树根等,2014)。但龙王庙组白云岩中缺少大量的蒸发岩伴生,这与传统的蒸发、回流白云岩应该有所不同。该套白云岩地层的形成机制尚不明确,需进一步详细研究。

对川中地区下寒武统龙王庙组优质储层的特征及其形成机理的认识尚不十分清楚。尤其是现今在龙王庙组储层中发现大量顺层分布的拉长状溶蚀孔洞,这些孔洞是龙王庙组最主要的储集空间。目前仅有个别学者将其成因解释为加里东期风化壳岩溶的产物(周进高等,2015;金民东等,2014)。然而,在实际研究中,川中地区龙王庙组顶部未见不整合面,仅在盆地西边局部地区龙王庙组顶部遭受剥蚀,因此,仅受表生风

化壳岩溶作用不足以形成川中地区龙王庙组储层中大量的溶蚀孔洞，其形成原因仍有待进一步明确。

因此，针对上述科学问题，本书将以川中地区下寒武统龙王庙组为研究对象，探讨龙王庙组发育的地层、沉积相特征以及龙王庙组优质储层的基本特征，并着重解决龙王庙组厚层白云岩形成机制以及其中大量溶蚀孔洞的成因问题。最终明确川中龙王庙组特大型天然气藏的储层形成机理，并建立优质储层成因演化模式。希望通过本书的研究，为川中地区安岳气田磨溪—高石梯以外的区块乃至整个四川盆地龙王庙组的油气勘探提供理论依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 碳酸盐岩储层研究

随着我国碳酸盐岩油气勘探的深入，针对深层碳酸盐岩优质储层形成机理，马永生等(2010)提出“三元控储”理论，认为储层是经过沉积作用、成岩作用、构造作用综合叠加改造的结果，即有利的沉积相带、有利的成岩作用以及后期构造改造形成了优质的储层。2012年，赵文智等总结中国海相碳酸盐岩储集层成因类型特征(表1-2)，认为按照成因划分，碳酸盐岩储层主要包括三类：沉积型、成岩型以及改造型。这是对碳酸盐岩优质储层“三元控储”理论的实例补充和理论升华。

沉积型储集层是指主要受沉积作用和古地理环境共同控制的一类碳酸盐岩储集层。沉积型储层中最为主要的是碳酸盐岩台地上发育的礁/滩相储层(王恕一等, 2010; Rousseau et al., 2005; Blomeier and Reijmei, 2002; Husinec et al., 2006)，礁/滩储层处于台地上的高能相带，生物礁常常与生屑滩共生，形成礁/滩复合体(赵文智等, 2012)。在广阔的碳酸盐台地上，生物礁和颗粒滩常可演化成优质的储集体(孙启良等, 2008; 郭泽清等, 2005; Vinopal et al., 1978; Riding, 2002; Jardine and Wilshart, 1982)。就世界范围内来看，在礁/滩相储层中发现了许多特大型油气田(张兵, 2010)，如墨西哥的黄金港油田、加拿大西部泥盆系油田、四川盆地普光气田、元坝气田等(马永生等, 2005)。生物礁的生长除了生物因素以外，还与古纬度、古气候、水动力、水体条件以及陆源碎屑等的影响和大地构造、湖底地形的控制有关(郭泽清等, 2005; 马永生等, 2006)。碳酸盐岩颗粒滩的发育与分布主要受到板块运动与基底断裂(孟祥化等, 2003; 邬光辉等, 2005)、相对海平面变化(王兴志等, 2002; 李凌等, 2008; 蒋志斌等, 2008; Bergman et al., 2010; 文龙等, 2012)、沉积微地貌(周彦等, 2007; 刘宏等, 2009; 谭秀成等, 2009, 2011; 周进高等, 2014)、洋流及潮汐变化(Bergman et al., 2010; Reeder et al., 2008)等多种地质因素影响。礁/滩相储层除了直接受控于生物礁和颗粒滩沉积时的特征及相带外，也与后期成岩改造有关(郭彤楼, 2011; 党录瑞等, 2011; 张建勇等, 2013)。

此外，沉积型储层还包括一类沉积型白云岩储层，即在沉积期形成的白云岩。这类白云岩并不是指沉积的原生白云岩，而是在同生—准同生期由蒸发泵或渗透回流形成的

表 1-2 中国海相碳酸盐岩储集层成因类型与基本特征(据赵文智等, 2012)

储集层类型		形成机理	基本特征	典型实例	
				塔里木盆地	鄂尔多斯盆地
沉积型 储集层	进积-加积型 镶边台缘 礁/滩	高能礁/滩沉积受 早表生大气淡水 淋溶+埋藏岩溶作 用综合影响	岩性以生屑灰岩、颗粒灰岩为主; 储 集空间为生物格架孔、体腔孔和粒间 孔、粒间溶孔等	塔中1号带良里塔格 组、鹰山组	西缘、南缘中上奥 陶统
	缓坡退积型 台内礁/滩		岩性以台内生屑砂屑滩、颗粒灰岩滩 为主; 储集空间以基质孔为主, 少量 格架孔	塔北——间房组、 鹰山组	台内长兴组—飞仙 关组
	蒸发潮坪 白云岩	萨布哈白云岩+早 表生大气淡水溶 蚀型	岩性以蒸发潮坪泥粉晶白云岩为主; 储集空间以石膏结核溶孔+粒间孔为 主, 少量晶间孔	塔北、塔中中下寒 武统(和4井、牙哈 10井等)	中下三叠统嘉陵江 组和雷口坡组
埋藏型 白云岩 储集层	蒸发台地 白云岩	渗透-回流白云岩 +早表生大气淡水 溶蚀型	岩性以颗粒白云岩、藻礁白云岩为主; 储集空间为铸模孔、粒间溶孔、藻礁 格架孔等	塔北、塔中中下寒 武统(牙哈7x-1井、 方1井等)	中下三叠统嘉陵江 组、雷口坡组和川东 石炭系黄龙组
	埋藏白云岩	交代作用+重结晶 作用	岩性以细、中、粗晶白云岩为主; 储 集空间以晶间孔、晶间溶孔为主, 少 量溶蚀孔、溶洞等	塔北、塔中上寒武统 及下奥陶统蓬莱坝组 (东河12井、英买32 井竺)	上寒武统三山子组, 中部马家沟组四段, 南缘奥陶系
	构造-热液白云岩	热液白云石化作 用+热液溶蚀作用	鞍状白云石, 斑块状, 受断裂控制; 储集空间主要以残余溶蚀孔洞和晶间 孔为主	晚海西期断裂—热液 活动区	晚海西期断裂—热液 活动区
改造型 溶滤型岩 溶储集层	层间岩溶	层间岩溶作用	发育于巨厚碳酸盐岩层系内的古隆起 及其斜坡部位, 储集空间为溶蚀孔、 洞、缝和未-半充填大型溶洞	巴楚——塔中中下 奥陶统鹰山组、蓬 莱坝组	威远震旦系灯影组 和川东石炭系黄龙组
	顺层岩溶	顺层岩溶作用	与潜山岩溶伴生, 发育于古隆起围斜 低部, 循环深度可达几百至数千米; 储集空间以深蚀孔、洞、缝和未-半充 填大型溶洞为主	塔北南缘——鹰山 组、间房组	西缘中上奥陶统和 靖边气田马家沟组
	潜山(风化壳)岩溶	喀斯特岩溶+垂 向、埋藏等岩溶 作用	发育于古隆起核部, 储集空间包括缝 洞、基质孔等, 构成岩溶缝洞体系	轮南凸起和麦盖提 斜坡区的奥陶系灰 岩潜山	龙岗地区三叠系雷 口坡组

白云岩。往往形成于盐度较高、水体较浅的地带，岩性较纯。这类白云岩储层在我国塔里木盆地寒武系、鄂尔多斯盆地马家沟组以及四川盆地雷口坡组均有发现。

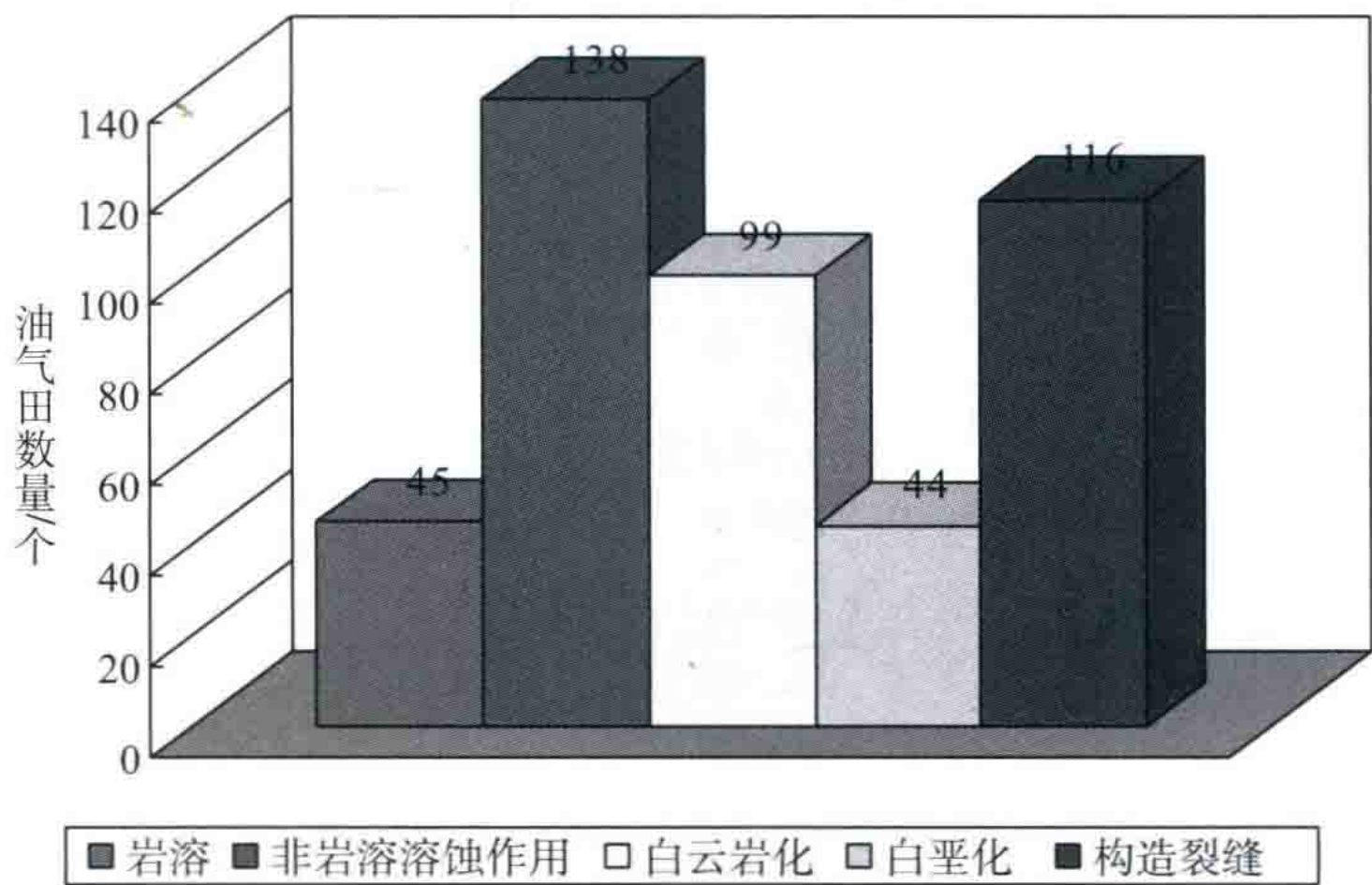


图 1-1 世界主要碳酸盐岩油气田成岩作用(据江怀友，2008)

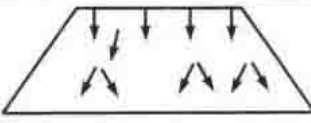
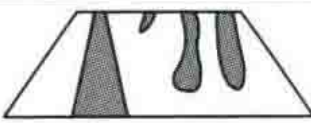
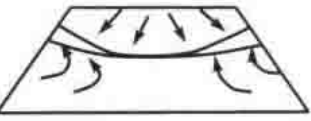
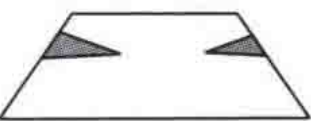
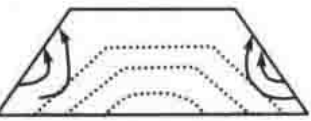
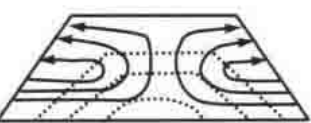
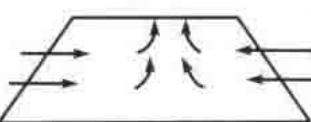
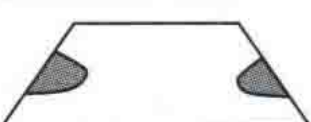
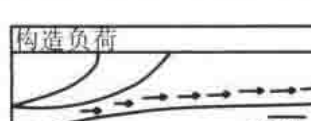
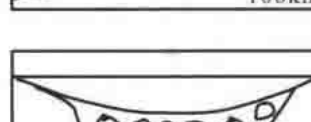
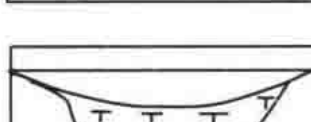
成岩型储集层是指形成于埋藏成岩环境中的碳酸盐岩储集层(赵文智等，2012)，其中包括了两种最主要的类型：埋藏白云岩储层和热液白云岩储层。改造型储集层是指碳酸盐岩暴露地表后，受大气淡水改造而形成的较复杂碳酸盐岩储集层。这两大类储层均是在碳酸盐岩沉积体脱离沉积水体进入埋藏阶段，发生后期成岩改造形成的。由于碳酸盐岩成岩作用极为活跃，地层在沉积后便有各类成岩作用的参与，成岩作用与油气的生成、演化有着紧密的联系，因而与储层息息相关。据目前世界主要碳酸盐岩油气田成岩作用的分类统计(江怀友等，2008)(图 1-1)，除去非岩溶溶蚀作用外，最主要的成岩作用为白云岩化作用和岩溶作用。这两种类型的成岩作用是碳酸盐岩储层形成的关键，也是当今世界性的科学难题。

1.2.2 白云岩化作用研究

白云岩储层是一类重要的碳酸盐岩油气储层，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有超过 80%是分布在白云岩中(Zengler et al. , 1980)，在苏联、欧洲西北部和南部、非洲南部和西部、中东及远东地区，也发现了大量的白云岩油气储层(Sun, 1995)。在中国，特别是四川盆地，绝大多数天然气藏都分布在白云岩地层中，如震旦系灯影组、寒武系龙王庙组、石炭系黄龙组、二叠系长兴组和三叠系飞仙关组等。因此，针对这些分布广泛发育较好的白云岩储层，明确其白云岩成因对预测白云岩储层具有十分重要的理论与现实意义。然而，白云岩成因一直是地质学界研究的热点与难点，对它的研究已经持续了 200 多年，地质学家们建立了多种模式来解释不同水文、成岩、构造等背景下形成的白云岩(Purser et al. , 1994; Land, 1985)，提出了原生成因(Tucher, 1982)、微生物白云岩化(Moore et al. , 2004)、萨布哈(Warren, 2000; HSÜ et al. , 1969)、卤水渗透回流(Adams et al. , 1960; McKenzie, 1980)、混

合水(Badiozamani, 1980; Li et al. , 2013、2015)、埋藏压实驱动(Illing, 1959; Machel, 1987)、构造挤压(Oliver, 1986; Qing, 1994)、热对流(Morrow, 1988; Evans et al. , 1989; Garven, 1995)、热液白云岩化(Duggan et al. , 2001; Davies et al. , 2006)以及多种海水成因的白云岩化模式(表 1-3)。

表 1-3 不同环境模式的白云岩化, K_v 垂直流, K_h 水平流(据 Machel, 2004)

白云化模式	Mg^{2+} 的来源	Mg^{2+} 的供给机制	水文模式	预测的白云岩分布样式
A 回流白云化	海水	风暴补给 蒸发泵 密度-驱动流		
B 混合带白云化	海水	潮汐泵		
C1 海水白云化	正常海水	斜坡对流 ($K_v > K_h$)		
C2 海水白云化	正常海水	斜坡对流 ($K_v > K_h$)		
D1 埋藏白云化 (局部尺度)	盆地页岩	压实驱动流		
D2 埋藏白云化 (区域尺度)	不同地下流体	构造驱动 地形驱动的流体		
D3 埋藏白云化 (区域尺度)	不同地下流体	热-密度对流		
D4 埋藏白云化 (局部和区域尺度)	不同地下流体	断层的构造 再激活(地震泵)		

其中以 Adams 等(1960)提出的超盐度渗透回流白云岩化模式最为经典,应用范围也极广,可以解释盆地级别的白云岩成因(Shields, 1995; Potma, 2001),该白云岩化模式形成于覆盖或上倾于石灰岩构造之上的蒸发潟湖和局限盆地中,高盐度卤水向下渗流进入灰岩地层并使之白云岩化(Adams et al. , 1960)。目前的研究认为,任何形成于向下渗透的蒸发卤水中的白云岩,包括那些形成于萨布哈环境的白云岩,都可被归为回流渗透白云岩成因。高盐度潟湖或盆地中海水的蒸发作用导致石膏的沉淀,使残留的蒸发卤水中 Mg/Ca 值升高,而且进一步的蒸发作用会导致盐岩的沉淀,并产生密度高达 $1.30g/mL$ 的卤水。这些高密度卤水在向下渗流时经下伏碳酸盐岩沉积物将其中密度较小的孔隙流体置换,并使石灰岩发生白云岩化(McKenzie, 1980)。流体流动往往发生在具有高孔隙度和渗透率的粒屑灰岩中,而白云岩化作用可以进一步提高这种储层的质量,其上覆往往堆积了大套的蒸发岩作为盖层。回流渗透白云岩化作用可以形成不同规模的白云岩储层,包括形成在小型蒸发浅水盆地中的厚度不均一的白云岩储层,这些储层从局部陆棚到陆棚边缘带均有分布。如美国二叠盆地中部沿圣安德烈斯走向带发育的白云岩储层就是较大型的渗透回流白云岩成因(Ward et al. , 1986);沙特阿拉伯的盖提夫油田的 Arab-D 白云岩储层也与高盐度卤水渗透回流有关(Wilson, 1985)。通常情况下,渗透回流白云岩形成于具有厚层蒸发岩的潮上带。

然而,这一模式不能应用于缺少大量蒸发岩伴生的大套白云岩中。Sun(1994)提出假说认为在地质历史中的温室期,在低纬度环潮汐带高频沉积旋回引起海水不同程度咸化,

并在早期沉积物中发生淹没和回流作用，导致白云岩化，这种白云岩往往没有大量蒸发岩伴生出现(Sun, 1994)。根据 Adams 等(1960)对蒸发海水浓度的划分，这种缺少大量蒸发岩的白云岩化作用可以称为中等盐度海水白云岩化，指盐度高于海水但低于石膏大量沉淀的微咸流体(一般在 72‰~199‰)受回流渗透的驱动，在准同生或成岩早期交代石灰岩形成白云岩(图 1-2)。这种中等盐度海水的回流渗透作用(Kirkland et al., 1981)通过实验室的数据模拟已得到证实(Lucia, 1967; Simms, 1984)，同时越来越多的证据及研究表明，缺乏大量蒸发盐伴生的浅海灰岩的大规模白云岩化可能与中等盐度海水的回流渗透作用有关(Sun, 1994; Qing, 1998, 2001; Melim et al., 2002; Eren et al., 2007; Rameil, 2008)。

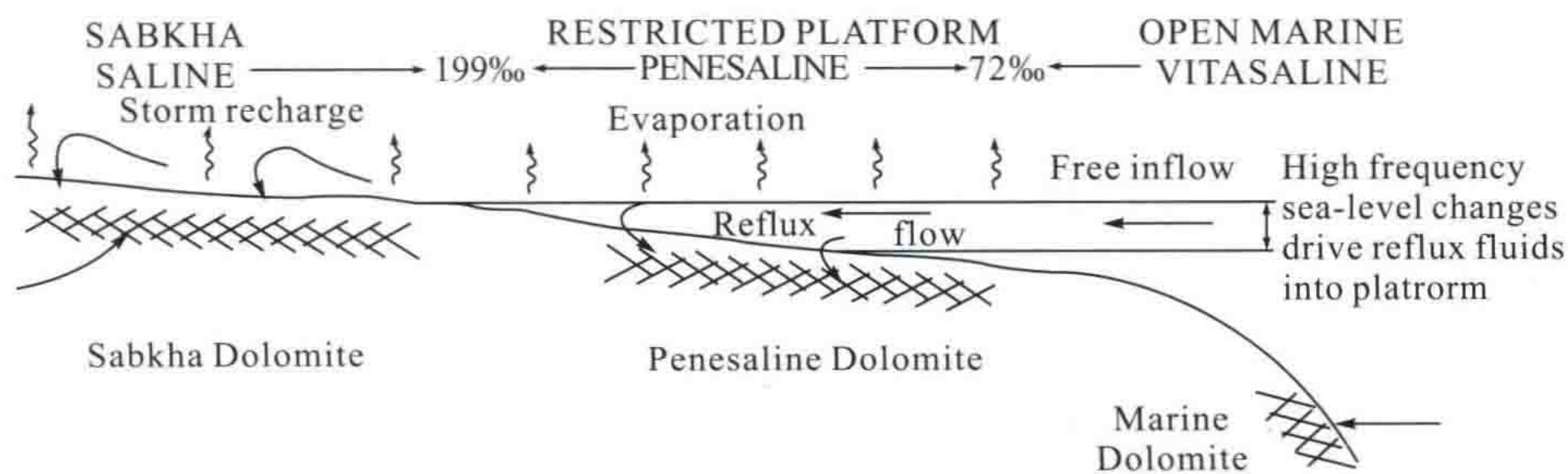


图 1-2 局限碳酸盐岩台地内受高频海平面变化引起的中等盐度海水白云岩化(据 Qing, 1998)

Sabkha Dolomite: 萨布哈白云岩; Penesaline Dolomite: 中等盐度白云岩; Marine Dolomite: 海水白云岩; Sabkha: 萨布哈; Restricted platform: 局限台地; Open Marine: 开阔海; Storm recharge: 风暴补给; Evaporation: 蒸发作用; Saline: 咸水; Penesaline: 中等盐度; Vitasaline: 生理盐度; Free inflow: 自由海水流入; High frequency sea-level changes drive reflux fluids into platform: 高频海平面变化导致正常海水补给

1.2.3 碳酸盐岩岩溶作用研究

喀斯特(karst)一词产生于 100 多年前，当时是作为原南斯拉夫西部伊斯利亚半岛石灰岩高原的地理专用名词。“喀斯特”的原始定义是表示具有某种特殊地貌和水文条件的地理区域，具有地貌学上的意义。随着地质学研究的不断发展，20 世纪 70 年代以来，该名词已经演化为全世界所通用的地质学和地貌学专门术语。在 1966 年我国第二次“喀斯特”会议上，决定将“喀斯特”一词改称为“岩溶”，“喀斯特作用(karstification)”则改称为“岩溶作用”。1981 年，在山西召开的“北方岩溶学术讨论会”上，议定“岩溶”和“喀斯特”二者可通用。

随着地质学家对岩溶研究的深入，对“岩溶”一词的认识也逐渐发生改变：①Roehl (1967)认为，岩溶实际上是一种暴露于大气中经过成岩作用改造的特殊地貌，它具有一系列清晰外貌特征，通常可进行成因解释。②Walkden(1974)通过对英格兰德比郡石炭系灰岩地表的研究，认为岩溶产物常被年轻的沉积物或沉积岩覆盖，这包括过去形成的残留古岩溶和被沉积物覆盖的埋藏。③Estban 和 Klappa(1983)将岩溶理解为一种成岩相，是碳酸盐岩体暴露于大气水成岩环境中留下的一种标记，在暴露过程中受到大气水对碳酸钙溶解和迁移的控制，可在多种构造背景和气候条件下发生，并形成特殊的具可

辨识性的地貌景观。④任美锷(1983)认为岩溶作用是地表水和地下水对可溶性岩石的破坏和改造,包括机械过程(流水的侵蚀和沉积、重力崩塌和堆积等)和化学过程(溶蚀和沉淀)等。岩溶作用及其产生的地貌特征和水文现象等统称为岩溶,它既包括了岩溶作用本身也包括了它的产物。⑤王大纯(1986)认为岩溶是流体和可溶岩石之间相互作用的过程,并由此而产生的地表及地下所有地质现象的总和。⑥James 和 Choquette(1988)在《Paleokarst》一书中指出:“岩溶包括了所有成岩形态,无论是地表的还是地下的、宏观的或者微观的,它们在化学溶蚀过程中发生并且改变了原有的碳酸盐岩层序。岩溶还包括了溶蚀孔洞的充填,这些充填可能会改变溶蚀空间,坍塌角砾岩和机械沉积沉积物可能充填于孔洞的底部或全部充填孔隙”。⑦袁道先(1993)在《中国岩溶学》中明确指出岩溶是指水对可溶性岩石的作用过程及其产物的总称。

由岩溶作用所形成的大量溶蚀缝洞可作为良好储集空间,对大型油气藏的形成具有重要意义(Fritz et al., 1993; 贾振远等, 1995; 陈学时等, 2004; 范嘉松, 2005; 罗平等, 2008)。因而,在20世纪60年代国外一些对碳酸盐岩地层学和沉积学感兴趣的地质学家就展开了对岩溶作用的研究(Roehl, 1985)。目前在墨西哥、阿联酋、美国德克萨斯等多个地区已取得了可喜的研究成果(McMechan et al., 1998; Loucks et al., 1996, 1999; Handford, 1995; Hammes et al., 1996a、1996b)。我国在上世纪70年代开始对岩溶进行了大量的研究后,在鄂尔多斯盆地奥陶系、四川盆地震旦系以及塔里木盆地奥陶系等多个层位发现了数十个大中型油(气)田(王兴志等, 1996; 戴弹申等, 2000; 张抗, 2001; 金振奎等, 2001; 林忠民, 2002; 肖玉茹等, 2003; Yang et al., 2014)。

岩溶储层是指成因与岩溶作用相关的储层。岩溶作用通常可以产生一定规模的溶蚀孔洞及溶缝,这些溶蚀空间往往可以作为岩溶储层主要的储集空间。长期以来对岩溶储层的研究认为,其发育多与地表的剥蚀和高低起伏的峰丘地貌有关,或受大型区域不整合的直接控制,岩溶产生的缝洞也多沿不整合面或岩溶地貌呈准层状分布,集中分布在不整合面之下0~50m的范围内,最大分布深度可以达到200~300m(Longman, 1980; Kerans, 1988; James, 1988; 郑兴平等, 2009)。近几年塔里木盆地和鄂尔多斯盆地的勘探实践与研究表明:由碳酸盐岩岩溶作用产生的缝洞不仅限于潜山区,在岩溶内幕区同样也发育有岩溶缝洞,这些缝洞体系可作为重要的油气储集空间,如塔北南斜坡和塔中北斜坡碳酸盐岩内幕区岩溶储层,这就使传统意义上的岩溶储层概念面临挑战(赵文智等, 2013)。事实上,不整合面类型、斜坡背景和断裂发育情况共同控制了岩溶作用类型、岩溶缝洞的发育程度和分布规律。根据这些主控因素可将我国海相碳酸盐岩岩溶储层划分为以下四个亚类(赵文智等, 2013)(表1-4)。

潜山(风化壳)岩溶储层发育在潜山区,与长期的角度不整合面有关,地貌差异较大,峰丘地貌特征明显。层间岩溶和顺层岩溶储层多发育于内幕区,层间岩溶与碳酸盐岩地层内部层面之间与短期的平行不整合相关,准层状分布;顺层岩溶主要发生在潜山周缘的斜坡部位,常呈环带状分布,与不整合面无直接关系;受断裂控制的岩溶则主要发育在内幕区断裂较发育的地区,多与不整合面无关,其发育强度和分布直接受断裂密度和分布的控制。

表 1-4 中国海相含油气盆地岩溶储层类型及分布(据赵文智等, 2013)

序号	岩溶储层亚类		定义	实例	
1	潜山区	潜山(风化壳)岩溶储层	灰岩潜山岩溶储层	分布于碳酸盐岩潜山区, 与中长期的角度不整合面有关, 准层状分布, 围岩为灰岩, 峰丘地貌特征明显, 潜山岩溶作用时间早于上覆地层晚于下伏地层的形成时间, 上覆地层为碎屑岩层系	轮南低凸奥陶系鹰山组
			白云岩风化壳储层	分布于碳酸盐岩潜山区, 与中长期的角度不整合面有关, 准层状分布, 围岩为白云岩, 地貌平坦, 峰丘特征不明显, 潜山岩溶作用时间早于上覆地层晚于下伏地层的形成时间, 上覆地层为碎屑岩层系	①靖边奥陶系马家沟组五段; ②牙哈—英买力寒武系白云岩; ③龙岗三叠系雷口坡组
2		层间岩溶储层	分布于碳酸盐内幕区, 与碳酸盐岩层系内部中短期的平行(微角度)不整合面有关, 准层状分布, 垂向上可多套叠置, 层间岩溶作用时间介于上覆地层和下伏地层形成时间之间	塔中北斜坡奥陶系鹰山组	
3	内幕区	顺层岩溶储层	分布于碳酸盐岩潜山周缘具斜坡背景的内幕区, 环潜山周缘呈环带状分布, 与不整合面无关, 顺层岩溶作用时间与上倾方向潜山区的潜山岩溶作用时间一致, 岩溶强度向下倾方向逐渐减弱	塔北南斜坡奥陶系鹰山组	
4		受断裂控制岩溶储层	分布于断裂发育区, 尤其是背斜的核部, 与不整合面及峰丘地貌无关, 没有地层的剥蚀和缺失, 受断裂控制导致缝洞发育跨度大, 沿断裂呈栅状分布, 断裂诱导岩溶作用时间发生于断裂形成之后	英买 1—2 井区奥陶系——间房组—鹰山组	

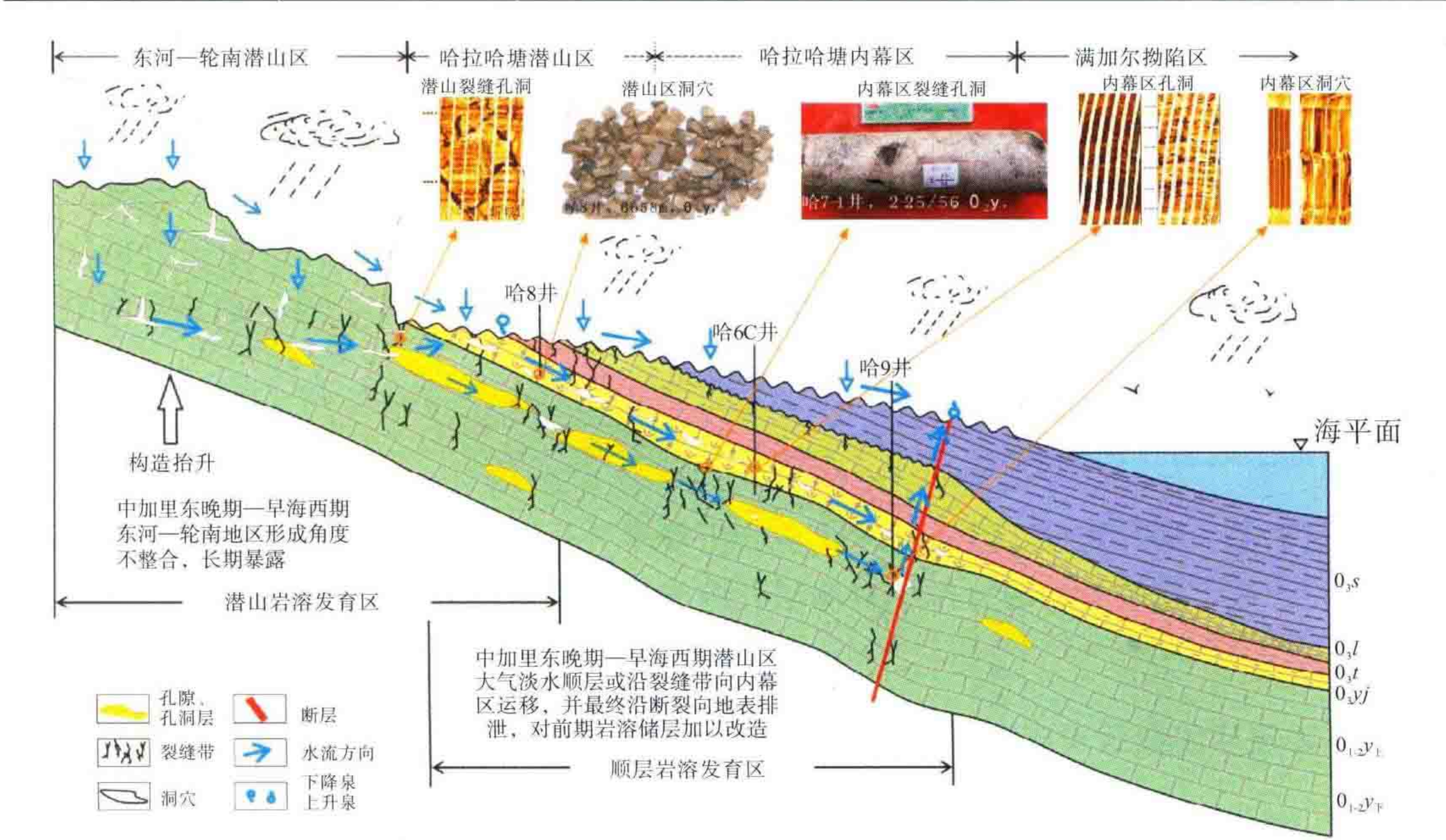


图 1-3 塔北南缘奥陶系——间房组—鹰山组顺层岩溶作用模式及储层形成机理示意图 (据乔占峰等, 2012)