

川北地区震旦系灯影组储层特征与主控因素

蒋航^{1,2}, 曾德铭^{1,2}, 王兴志^{1,2}, 冯明友^{1,2}

1 西南石油大学地球科学与技术学院; 2 油气藏地质与开发工程国家重点实验室

摘要 近年来,四川盆地震旦系灯影组的油气勘探开发不断深入推进,川北地区作为后续勘探接替区,其灯影组储层的相关研究亟待进行。综合川北地区灯影组的地层、岩石及矿物特征,采用分析化验等手段揭示其储层特征,结果表明:灯二段、灯四段为川北地区灯影组储层发育层段,颗粒粘连白云岩、叠层状微生物白云岩和粉晶白云岩为主要储集岩类,次生溶孔、溶洞为主要储集空间;灯影组储层类型多样,发育孔-洞型、孔隙型、孔隙-裂缝型及溶洞型储层,以孔隙-裂缝型储层质量最佳。储层发育特征表明:滩丘沉积是灯影组储层发育的物质基础,后期岩溶改造是储层发育的关键;灯二段滩丘厚度相对更大,而储层物性相比灯四段较差。基于宏观储层演化和微观孔隙特征,建立了川北地区灯影组2种储层发育模式:灯二段以表生岩溶为储层发育的主控因素,见有不同期次白云石胶结和上覆地层细粒沉积物充填;灯四段以埋藏溶蚀为储层发育的主控因素,存在广泛的重结晶造成的溶蚀、溶蚀流体中硅质组分对孔隙的充填、以及溶蚀孔隙中沥青对储层的保护。依据不同的岩溶模式,可预测灯二段、灯四段有利储层的发育位置:在潜流带与滩丘沉积体叠加的部位,灯二段储层发育最佳;自顶部向下,自台缘向台内,灯四段储层质量逐渐下降。

关键词 川北地区;震旦纪;灯影组;白云岩储层;主控因素;岩溶模式

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

近年来,川中高石梯—磨溪地区灯影组的油气勘探取得巨大突破^[1]。有关四川盆地灯影组古地貌与沉积环境^[2-8]、储层特征与主控因素^[9-11]等的研究不断深入并取得了一系列成果。其中,绵阳—长宁拉张槽控制的古地貌形态^[12-13]、桐湾运动导致的表生期岩溶^[5-7]、“相控+岩溶”的储层主控因素^[29]等都是近期取得的川中地区灯影组储层的重要认识。川北地区作为后备勘探区,位于绵阳—长宁拉张槽的东北缘,具有与川中地区相似的古地貌及沉积环境,但其灯影组储层特征与控制因素尚不明确,笔者基于4口钻井资料、17条露头剖面开展相关研究,以期为后期的储层预测和勘探部署提供依据。

1 区域地质概况

研究区位于四川盆地北缘,构造上包括四川盆地川北拗陷带的大部、川东高陡褶皱带的西北部,和米仓山—大巴山断褶带(图1)。区内灯影组自下而上分为4段(图2),分别对应4个不同沉积时期,并在岩相记录中体现了2期三级海平面旋回及2次幕式构

造运动^[14-15]。灯一期开始进入第1期海平面旋回,川北地区由深水沉积逐渐过渡为碳酸盐台地沉积,发育了一套质纯的灰白色泥—粉晶白云岩,厚度在50m左右。随着碳酸盐台地不断发育,温暖的水体环境与丰富的营养物堆积使得蓝细菌繁盛,由此在灯二段形成由微生物白云岩、颗粒粘连白云岩、砂屑白云岩、泥—粉晶白云岩叠合而成的富微生物层段,厚度为200~520m;桐湾运动I幕使灯二段抬升剥蚀,并在顶部形成一定厚度的岩溶角砾岩。灯三期开始进入第2期海平面旋回,川北地区水体变深,主要发育盆地相沉积,岩性多为黑色泥页岩和硅质岩,但宁强胡家坝—强1井—曾1井一带,以及天星1井—南江杨坝—镇巴巴山一线以南,则表现为受物源影响的潮坪沉积,典型岩性为紫红色—土黄色薄层泥岩、粉砂岩、泥质粉砂岩以及灰色含泥白云岩、含粉砂白云岩。在随后的海平面上升过程中,再次演化成为碳酸盐台地,灯四段沉积了与灯二段类似的泥晶白云岩及微生物白云岩,厚度为40~380m;灯四段顶部因桐湾运动II幕形成暴露剥蚀不整合面^[8,12-15](图2)。

收稿日期:2018-06-05;改回日期:2018-10-14

本文受国家科技重大专项课题“全球性海侵(湖侵)与气候变化对大型地层油气藏形成的控制作用”(编号:2017ZX05001001-002)资助

第一作者:蒋航,西南石油大学矿产普查专业在读硕士研究生,主要从事沉积储层研究。通信地址:610500 四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学地球科学与技术学院;E-mail:304176319@qq.com

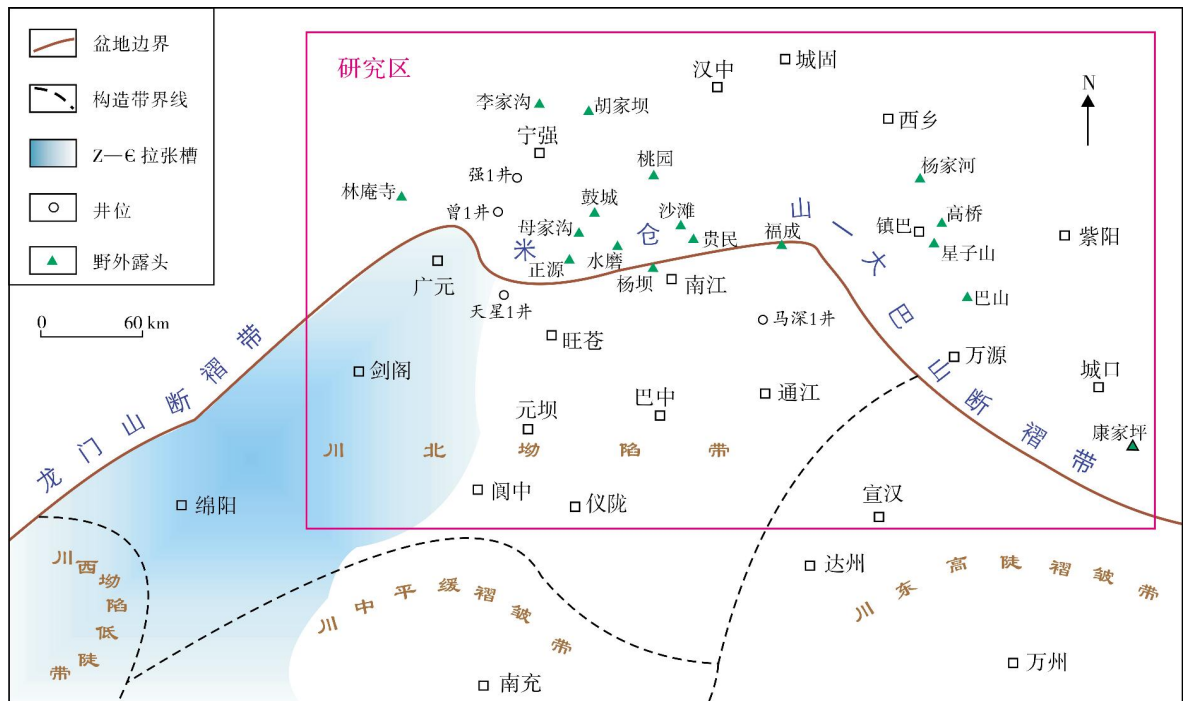


图1 研究区位置及资料点分布(拉张槽形态据文献[12])

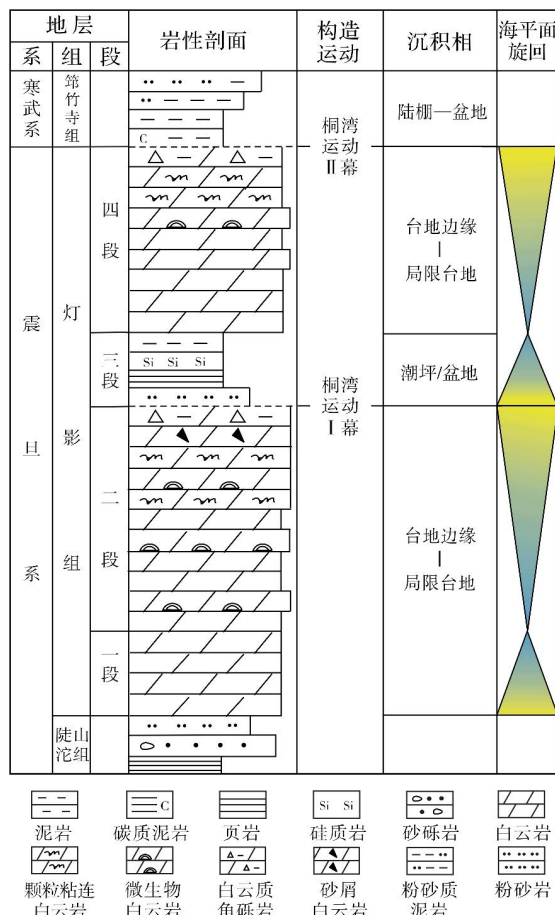


图2 川北地区震旦系地层柱状图

据刘树根等的研究^[12-13],灯影组沉积末期,在兴凯地裂运动与沉积分异共同作用下,四川盆地开始发育近南北走向的绵阳—长宁拉张槽,直至寒武纪龙王庙期才逐渐消亡,期间在拉张槽内陆续沉积了下寒武统麦地坪组和筇竹寺组的灰黑色泥页岩、粉砂质泥岩、黑色碳质泥岩等细粒沉积。川北地区元坝—阆中一线西侧(图1),灯四段发育盆地—斜坡相沉积,与其东侧的台缘沉积比较,这一区域地层厚度明显变薄,这可作为拉张槽存在的证据。

2 储层特征

2.1 岩石类型

灯影组储层主要分布在灯二段、灯四段的富微生物白云岩层段,与微生物滩、丘以及颗粒滩等沉积体密切相关。基于9个野外露头及2口钻井岩心的共计250个物性数据及500个薄片资料,对不同岩类的发育程度及储层物性特征进行了统计(表1,图3),将灯影组白云岩分为颗粒白云岩、微生物白云岩、晶粒白云岩等3类,进一步细分为11种(表1)。其中,构成灯影组储层的主要岩石类型为颗粒粘连白云岩、叠层状微生物白云岩和粉晶

白云岩。砂屑白云岩、核形石白云岩和细晶白云岩的储集性能中等—好,但分布较少;斑状微生物白云岩、泥晶白云岩虽然分布广、厚度大,但储集性能欠佳。

表 1 川北地区震旦系灯影组白云岩的岩石类型与储层关系

岩石类型		发育程度	储集性能
颗粒白云岩	砾屑白云岩	低	差
	砂屑白云岩	低	中等—好
	核形石白云岩	低	中等—好
	颗粒粘连白云岩	中等—高	中等—好
微生物白云岩	斑状微生物白云岩	中等	差
	叠层状微生物白云岩	高	中等—好
	绵层状微生物白云岩	低	中等—好
	凝块白云岩	低	差
晶粒白云岩	泥晶白云岩	中等—高	中等—差
	粉晶白云岩	中等—高	中等
	细晶白云岩	低	中等

2.2 储集空间类型与特征

基于岩心薄片、扫描电镜观察和宏观特征等,根据储集空间大小、形态、成因及其与岩石结构组分的关系,将川北地区灯影组储层的储集空间类型划分为 3 类 14 种(表2)。

2.2.1 孔 隙

区内灯影组各类次生溶孔发育程度较高(表 2)。次生孔多是在残余粒间孔、晶间孔、残余格架孔等

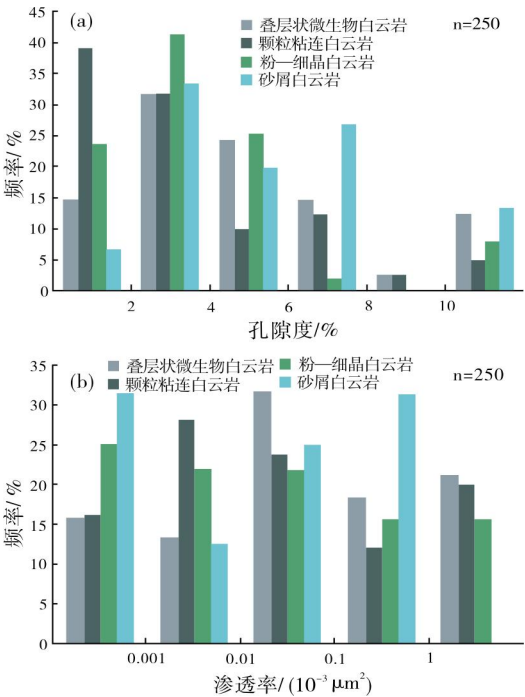


图 3 川北地区震旦系灯影组不同岩性的物性分布直方图

原生孔隙的基础上,经成岩作用溶蚀改造、扩大而成,因此常具有较原生孔隙更大的储集空间。依据发育位置,次生孔可分为粒间溶孔(图4a)、粒内溶孔(图4b)、晶间溶孔(图4c)及格架溶孔(图4d)。随着埋深与温度的增加,这些溶孔会遭受不同程度的重结晶充填而被破坏。膏模孔出现在灯四段极少发育的膏质泥—粉晶白云岩中,是石膏在成岩过程中被溶解而形成的孔隙,其底部常分布有渗流粉砂,且连通性很差。

表 2 川北地区震旦系灯影组储层的储集空间类型及分布

储集空间类型			赋存的主要岩石类型	发育程度	分布层位
孔 隙	原生孔隙	残余粒间孔	砂屑白云岩	低	灯二段、灯四段
		残余粒内孔	绵层状微生物白云岩	低	灯二段、灯四段
		晶间孔	粉—细晶白云岩、颗粒粘连白云岩	中—高	灯二段、灯四段
		格架孔	颗粒粘连白云岩、叠层状微生物白云岩	低—中	灯二段、灯四段
	次生孔隙	粒间溶孔	颗粒粘连白云岩、砂屑白云岩	高	灯二段、灯四段
		粒内溶孔	砂屑白云岩、核形石白云岩、颗粒粘连白云岩	低—中	灯二段、灯四段
		晶间溶孔	粉—细晶白云岩	中—高	灯二段、灯四段
		格架溶孔	颗粒粘连白云岩、叠层状微生物白云岩	中—高	灯二段、灯四段
		膏模孔	膏质泥晶白云岩	低	灯四段底部
洞 穴	次生洞穴	格架溶洞	颗粒粘连白云岩、叠层状微生物白云岩	中—高	灯二段、灯四段
		“葡萄花边”洞	白云质岩溶角砾岩、颗粒粘连白云岩、叠层状微生物白云岩	中等	灯二段中上部
		角砾间溶洞	岩溶角砾岩、风化残积角砾岩	中等	灯二段中上部、灯四段中上部及顶部
裂 缝		构造裂缝	各类岩性	中等	灯二段、灯四段
		缝合线	各类碳酸盐岩	低	灯二段、灯四段

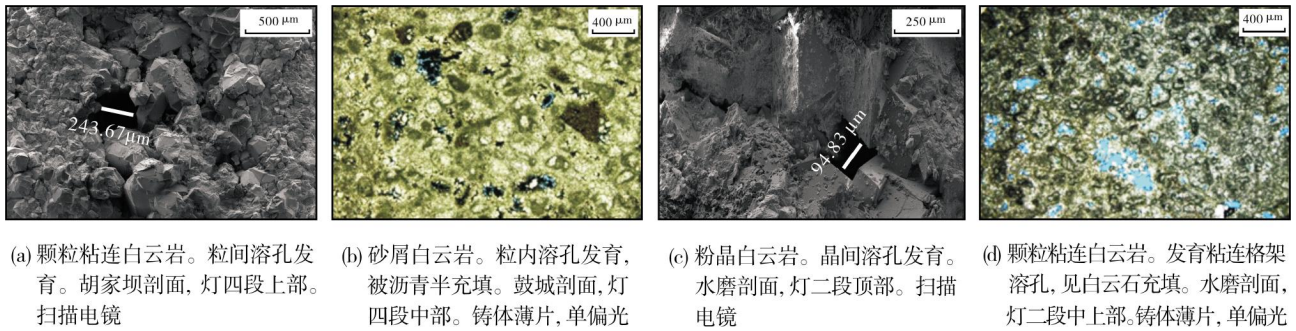


图 4 川北地区震旦系灯影组白云岩溶蚀孔显微特征

2.2.2 洞 穴

区内灯影组洞穴较为发育(表2)。这些洞穴均属于次生洞,主要由多期溶蚀及构造作用所形成,大小一般为0.2~5 cm,局部可能更大,是重要的储集空间。洞穴按成因可细分为格架溶洞(图5a)、“葡萄花边”洞(图5b)、角砾间溶洞(图5c)3种。格架溶洞主要发育于颗粒粘连白云岩、叠层状微生物白云岩和凝块白云岩中,为早期粘连格架孔洞经溶蚀扩大而成,

洞径较大,一般为5~15 mm,呈拉长状、不规则椭圆状近平行于层面分布,横向连通性较好,垂向连通较差,局部孤立。“葡萄花边”洞与四川盆地灯影组所特有的“葡萄花边”构造密切相关,是各种产状的溶沟、溶洞被多圈层“葡萄花边”纤状白云石、晶粒白云石充填后的残余空间^[16-17],在区内灯二段中上部较为发育,是最重要的储集空间。角砾间溶洞为岩溶角砾间被碎屑物质充填后的残余空间,空间多小于5 mm,分布不均且发育少。

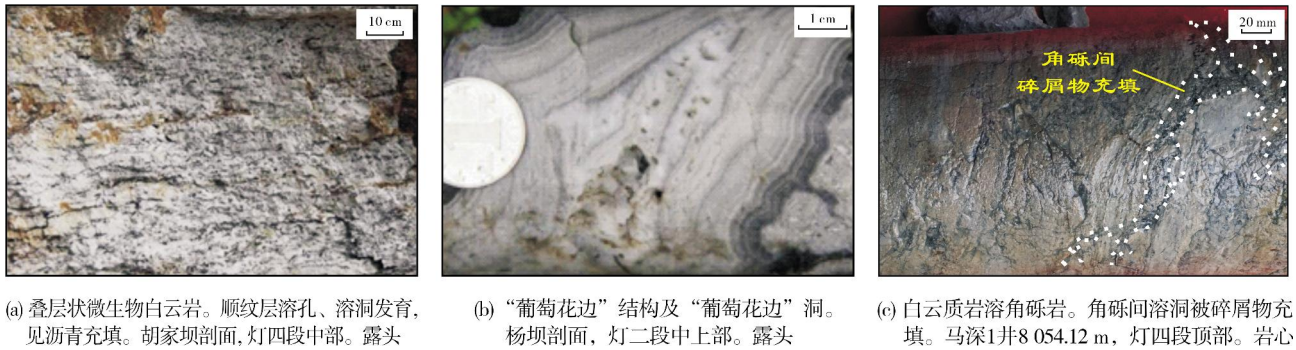


图 5 川北地区震旦系灯影组次生洞穴特征

2.2.3 裂 缝

对天星1井、马深1井岩心的观察统计表明,研究区内灯影组发育构造裂缝与缝合线。构造裂缝较为发育,组系众多,特征差异较大(表3);裂缝密度较大,且多数未充填,这可能与川北地区地处盆地边缘,

受喜马拉雅期构造运动的影响明显有关,因而形成了较多的与孔洞连接的有效裂缝(图6a,6b)。缝合线主要是在中—深埋藏阶段由压溶作用所形成,常发育在不同岩性交界面上,呈锯齿状(图6c),但川北地区灯影组缝合线并不十分发育。

表 3 川北地区天星 1 井、马深 1 井灯影组取心段构造裂缝统计

裂 缝 特 征		灯四段 裂缝数量/条	灯二段 裂缝数量/条	灯四段、灯二段裂缝累计(共 251 条)		
				数量/条	百分比/%	密度/(条·m ⁻¹)
产 状	垂 直	36	36	72	28.7	3.1
	水 平	73	11	84	33.5	3.6
	斜 交	70	25	95	37.8	4.1
充填程度	未充填	115	59	174	69.3	7.5
	半充填	30	3	33	13.2	1.4
	全充填	34	10	44	17.5	1.9
有效缝张开程度	中(0.2~2mm)	58	0	58	23.1	2.5
	小(<0.2mm)	121	72	193	76.9	8.4

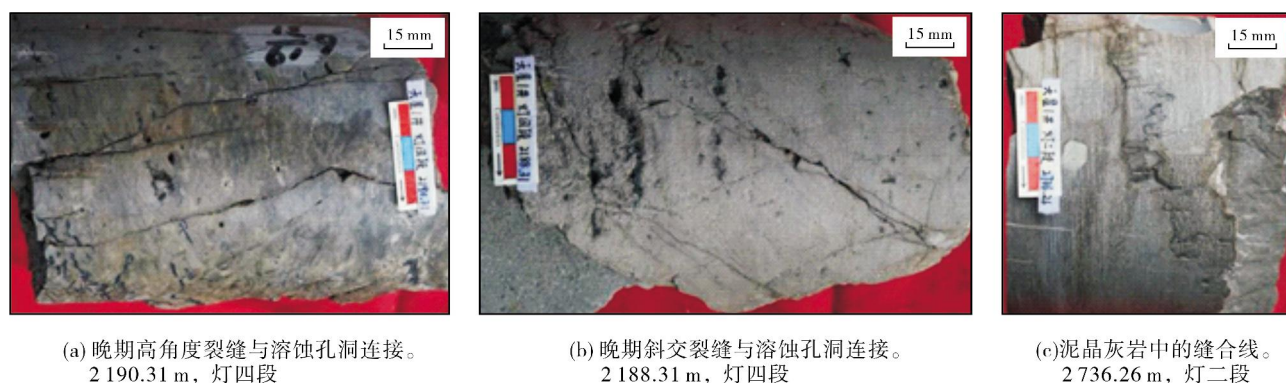


图6 川北地区天星1井震旦系灯影组岩心构造裂缝及缝合线发育特征

2.3 储层物性

对区内250个岩样(包括9个野外露头的200个岩样,天星1井、马深1井2口取心井的50个岩样)分层段进行物性统计分析,结果表明:灯二段储层孔隙度分布范围为0.33%~5.12%,平均为2.15%,样品孔隙度全部在6%以下(图7a);灯四段储层孔隙度分布范围为0.35%~21.69%,平均为4.95%,孔隙度主要集中在2%~8%之间(图7a),占其样品总数的71%,另有

11.3%的样品孔隙度大于10%;灯二段储层渗透率分布范围为 $(0.0001 \sim 6.03) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中,渗透率 $\geq 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的约占10.7%(图7b);灯四段储层渗透率分布范围为 $(0.0001 \sim 20.90) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $1.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中,渗透率 $\geq 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的约占13.5%(图7b)。整体上,川北地区灯影组为中—低孔、低渗型储层,其中,灯四段储层物性明显好于灯二段,相对高孔的样品占比大于灯二段,但灯四段、灯二段渗透性整体较差。

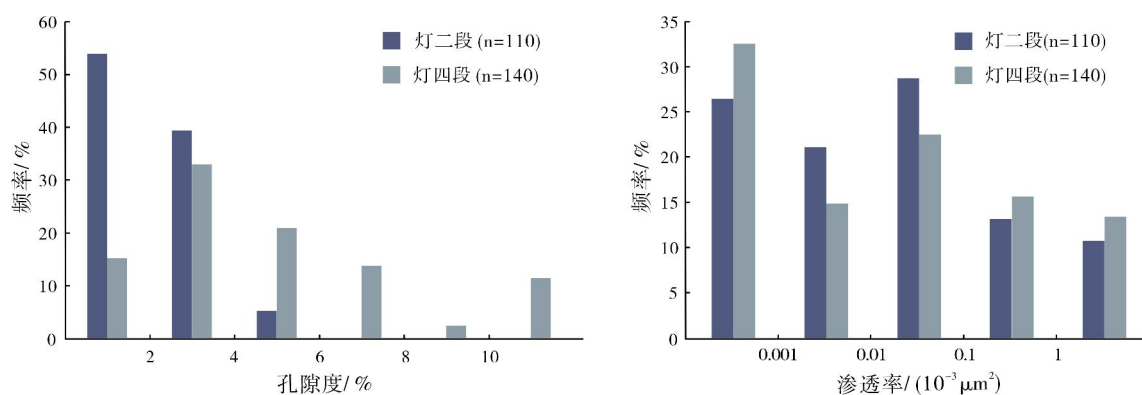


图7 川北地区震旦系灯影组二段、四段储层物性对比直方图

2.4 孔隙结构

选取具有不同孔隙度、孔隙类型的样品做压汞实验,根据压汞曲线及孔喉参数特征,可将灯影组储层分为中孔中喉、中孔细喉、细孔细喉3种孔隙结构类型(图8)。

中孔中喉型储层 主要分布在颗粒白云岩、颗粒粘连白云岩中,以各类溶蚀孔洞为主。例如,马深1井灯四段砂屑白云岩,粒间溶孔发育,平均孔隙度为6.60%,平均渗透率为 $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;中值喉道半径均值为 $0.27 \mu\text{m}$,最大喉道半径均值为 $1.74 \mu\text{m}$;孔喉

分布呈正态单峰形态,孔喉分选好。该类储层门槛压力和中值压力中等,进汞饱和度高,退汞效率一般(图8a),反映储层孔隙度较高、渗透率中等。

中孔细喉型储层 主要分布在颗粒粘连白云岩和粉晶白云岩中,以残余粒间孔、粒间溶孔以及格架溶孔为主。例如,天星1井灯二段颗粒粘连白云岩,粒间溶孔发育,平均孔隙度为3.20%,平均渗透率为 $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;中值喉道半径均值为 $0.02 \mu\text{m}$,最大喉道半径均值为 $1.35 \mu\text{m}$;孔喉分布呈双峰形态,孔喉分选差,非均质性强。该类储层具有较低的门槛压力,中值压力高,进汞饱和度较低,退汞效率较低(图8b),反

映储层孔喉细、渗透性较差。

细孔细喉型储层 主要分布在泥—粉晶白云岩中,以晶间孔和晶间溶孔为主。马深1井灯二段泥—粉晶白云岩平均孔隙度为2.32%,平均渗透率为

$0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;最大喉道半径均值为 $0.53 \mu\text{m}$;孔喉分布呈正态单峰形态,孔喉分选较好,但以细孔细喉为主。该类储层具有高门槛压力和低进汞饱和度,退汞效率低(图8c)。

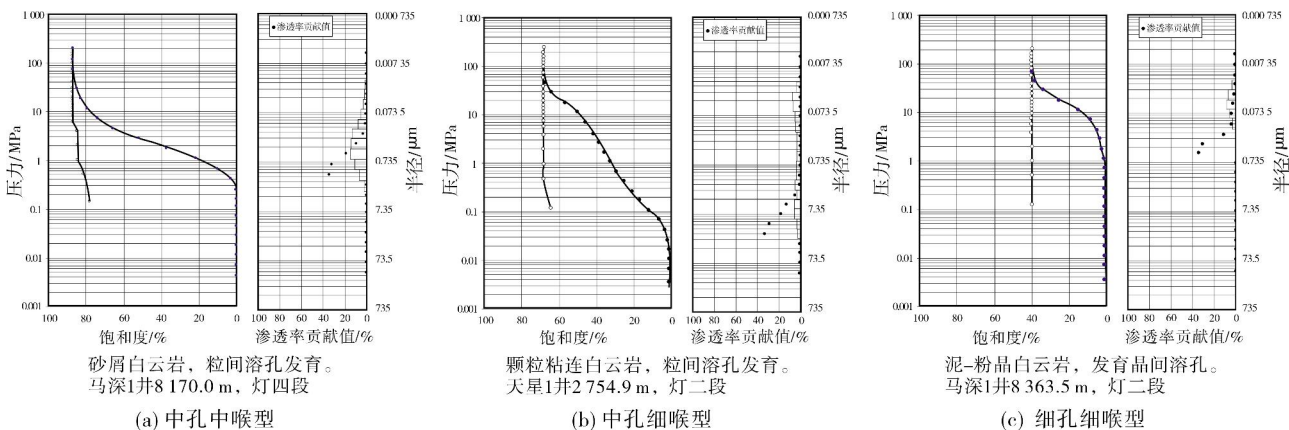


图8 川北地区震旦系灯影组不同类型孔隙结构压汞曲线

2.5 储层类型

根据储集空间类型及其组合特征,将川北地区灯影组储层类型划分为孔—洞型、孔隙型、裂缝—孔隙型、溶洞型等4种(图9)。

孔—洞型储层 如图9a所示,区内最为常见,主要发育在颗粒粘连白云岩和叠层状微生物白云岩中,溶蚀孔、洞是主要的储集空间。这类储层一般分布在原生孔隙发育的沉积相带,如颗粒滩和微生物丘,经后期溶蚀改造而形成,除保留有少量粘连格架孔外,更多的是粘连格架间溶孔、溶洞,溶洞一般小于1 cm,构造作用对其改造不强,裂缝欠发育。

孔隙型储层 如图9b所示,区内较为常见,主要

发育在砂屑白云岩、粉—细晶白云岩和微生物白云岩中,粒间溶孔、晶间孔、晶间溶孔和粘连格架孔是主要的储集空间,孔径一般小于2 mm,宏观上似“针孔”。这类储层一般是原生孔隙发育的层段,经过后期溶蚀改造而形成,裂缝欠发育。

裂缝—孔隙型储层 如图9c所示,中孔是主要的储集空间,裂缝虽可作为储集空间,但更重要的是作为渗流通道。相比单一孔洞型或单一裂缝型储层,孔洞和裂缝的共存极大地提高了储集、渗流能力。该类储层的发育受到沉积相和构造作用的共同影响。

溶洞型储层 如图9d所示,主要发育在灯二段、灯四段顶部。受桐湾运动导致的表生期岩溶作用的影响,下伏地层发生溶塌而形成各种岩溶角砾岩,一般发育较多的砾间洞,从而构成溶洞型储层。

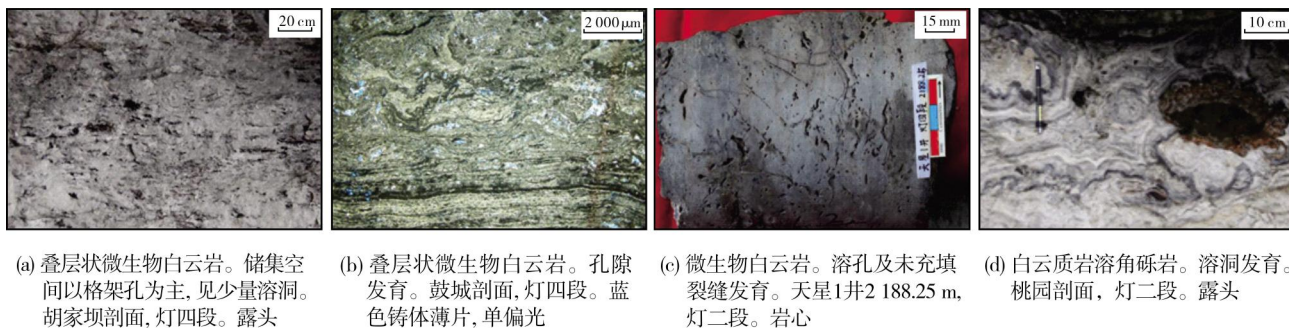


图9 川北地区震旦系灯影组储层类型及特征

3 储层主控因素

川北地区灯影组储层发育受沉积相控制,而后

期的岩溶改造对储层的形成起到了关键作用。灯二段、灯四段储层的岩溶改造及储层保存状况有明显差异,反映两者具有不同的岩溶控制因素。

3.1 沉积相是控制储层发育的物质基础

灯影组储层主要分布在灯二段、灯四段,有利沉积相主要为台地边缘的滩丘,其次是局限台地内的点滩、点丘。这些沉积相均具有相对的正地貌背景、较强的水动力条件和较多的营养组分,有利于颗粒的堆积和蓝细菌的生长^[18],主要发育各类颗粒白云岩、颗粒粘连白云岩和叠层状微生物白云岩等。这些岩类原生粒间孔、粘连格架孔极为发育。虽然这些原生孔隙在后来的成岩过程中局部消失,但颗粒与颗粒之间、颗粒与晶粒之间、富微生物层与贫微生物层之间都是成

岩压实的薄弱部位,也是后期岩溶改造的有利部位。

基于野外露头 and 钻井岩心,对灯二段、灯四段均发育滩丘沉积体的剖面分段进行滩丘厚度统计,结果如表4:灯二段滩丘平均厚度为101 m,平均占比为30.20%,鼓城剖面滩丘最大累计厚度达251 m;灯四段滩丘平均厚度为52 m,平均占比为20.15%,胡家坝剖面滩丘最大累计厚度为186 m。由此可见,较之灯四段,灯二段有利相带更发育,储层发育的物质基础更好。但前述储层物性分析表明,灯四段储层要优于灯二段(图7)。这也进一步说明后期成岩改造才是储层发育的关键。

表4 川北地区震旦系灯影组滩丘厚度统计

剖面或钻井	灯四段			灯二段		
	地层厚度/m	滩丘厚度/m	滩丘占比/%	地层厚度/m	滩丘厚度/m	滩丘占比/%
胡家坝剖面	390	186	47.69	125	56	44.80
鼓城剖面	196	133	67.86	626	251	40.10
水磨剖面	260	6	2.31	482	151	31.33
沙滩剖面	170	45	26.47	450	60	13.33
杨坝剖面	210	15	7.14	480	190	39.58
康家坪剖面	350	25	7.14	340	80	23.53
贵民剖面	220	19	8.64	480	40	8.33
天星1井	360	21	5.83	300	29	9.67
马深1井	243	20	8.23	90	55	61.11
平均值		52	20.15		101	30.20

3.2 表生岩溶是灯二段储层发育的关键

关于桐湾运动对灯二段、灯四段储层的影响,前人已做过大量研究,认为表生岩溶是川中地区灯影组储层发育的关键^[9-11]。川北地区灯影组也不例外,桐湾运动在灯二段、灯四段顶部形成了不整合面及与表生岩溶有关的孔、洞、缝(图5c,图9d,图10a)。灯二段中上部的颗粒粘连白云岩与叠层状微生物白云岩中,广泛发育表生期岩溶形成的拉长状溶蚀孔(图10a),但该套储层在埋藏期受到了强烈改造,表现在孔隙中充填大量的中—粗晶半自形—自形亮晶白云石(图10a,10b),具有发亮红光的阴极发光特征(图10c)。川北地区灯影组表生岩溶形成的储集空间,很大程度上受后期重结晶影响而被破坏,这是川北地区灯影组储层物性整体变差的主要原因。

以下2个方面的证据表明,川北地区灯二段较灯四段所经历的表生期岩溶更加强烈:

(1)表生期岩溶形成的葡萄花边白云石,在灯二段、灯四段中的分布有差异。“葡萄花边”构造的形成是不同期次白云石胶结的结果,且第Ⅰ期白云石胶结物呈纤状(图10d,10e),Na、K、Sr、Ba、Mn等微量元素化合物含量低,说明其形成时间是在表生期,形成环境为氧化开放体系^[19],因而“葡萄花边”初期所胶结的空间应是表生期形成的溶蚀孔、洞、沟。川北地区灯四段中几乎未见葡萄花边,而灯二段不论在平面上还是纵向上均有大规模的葡萄花边构造发育(图10f)。

(2)灯二段、灯四段的表生岩溶溶沟,在钻井岩心中的深度及岩溶特征有差异。天星1井岩心中,灯二段可见的溶沟最大深度为2 736.78 m,距该段顶界250 m左右,溶沟多被上覆灯三段黑色细粒沉积物充填(图10g),这表明灯二段溶蚀程度高、溶沟连通性较好;灯四段未见明显的溶沟发育,多为溶蚀孔洞,且规模较小。马深1井岩心中,灯二段可见的溶

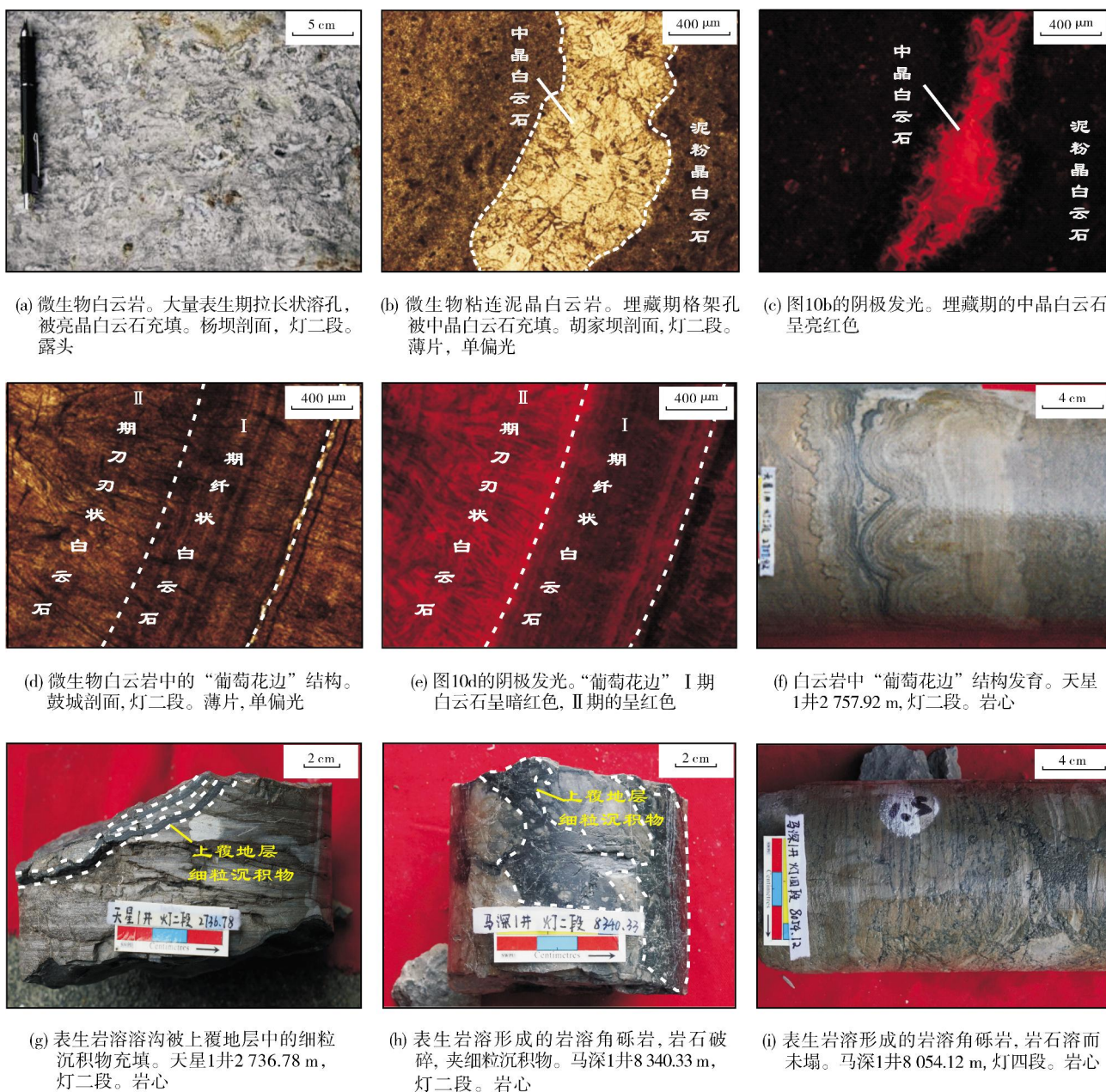


图10 川北地区震旦系灯影组表生岩溶特征

沟最大深度为 8 340.33 m, 距该段顶界 12.33 m, 溶蚀程度较大(图10h); 灯四段可见的溶沟最大深度为 8 054.12 m, 距该段顶界 11.12 m, 溶沟多是溶而未塌(图10i)。

可见, 灯二段所受的表生岩溶作用更为强烈, 这应是其储层发育的关键因素。

在桐湾运动 I 幕影响下, 灯二段表生期岩溶发育, 发育模式如图11: 上部垂直渗流带(灯二段上部), 水体在重力作用下以垂向运移为主, 形成较多近垂向分布的溶沟、溶洞, 并被上覆及周围地层中的

岩溶角砾等机械碎屑近全部充填, 储集性能较差; 中部水平潜流带(灯二段中上部), 在地下水的顶托作用下, 渗流水以水平运移为主, 地层中的颗粒滩、微生物丘等沉积体易于形成大量近水平方向分布的拉长状溶孔、溶洞, 这些溶孔、溶洞虽然在后期成岩过程中被较多的亮晶白云石充填, 但保留下来的孔洞仍可成为灯二段储层的主要储集空间。根据该岩溶模式, 灯二段储层主要发育在灯二段中上部的水平潜流带中, 而且与滩丘沉积体叠合位置的储层质量最佳。

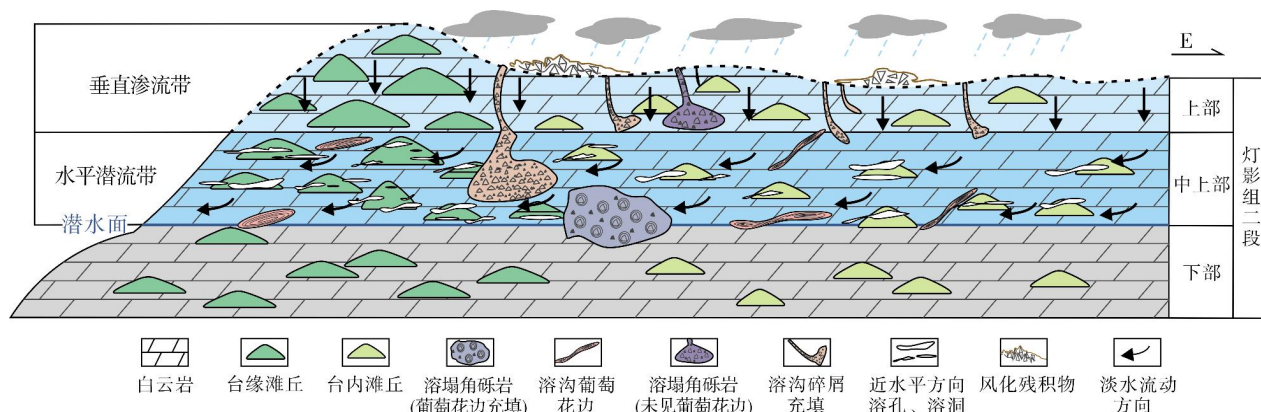


图11 川北地区震旦系灯影组二段表生期岩溶模式

3.3 埋藏岩溶是灯四段储层发育的关键

如前所述,就表生岩溶程度来讲,川北地区灯四段较灯二段更弱,但灯四段储层物性比灯二段更好,这意味着灯四段经历了与灯二段不同的成岩演化过程,即经历了更强的埋藏溶蚀。研究区灯四段上覆的筇竹寺组,以及绵阳—长宁拉张槽中的麦地坪组、筇竹寺组,构成了广泛分布的巨厚的烃源岩。埋藏期有机质在向液态烃转化以及液态烃向气态烃转化过程中,会产生大量的酸性流体,这些酸性流体可以对白

云岩中各种组分进行无选择性的溶蚀(图12a, 12b),从而形成较多的储集空间^[20]。在埋藏过程中,早期溶解的二氧化硅组分,因地层流体酸碱环境改变而在孔隙空间中沉淀出少量石英(图12c, 12d),从而使得面孔率有所降低。随着埋藏深度进一步加大,地温上升,进入储层的液态烃开始裂解成气态烃,残留的沥青则沉淀在孔隙周围(图12e, 12f),从而使得孔隙度进一步下降。从另一个角度讲,酸性流体及烃类的充注,一定程度上避免了后期深埋藏过程中白云石的进一步充填,从而保存了部分孔隙空间^[21-22]。

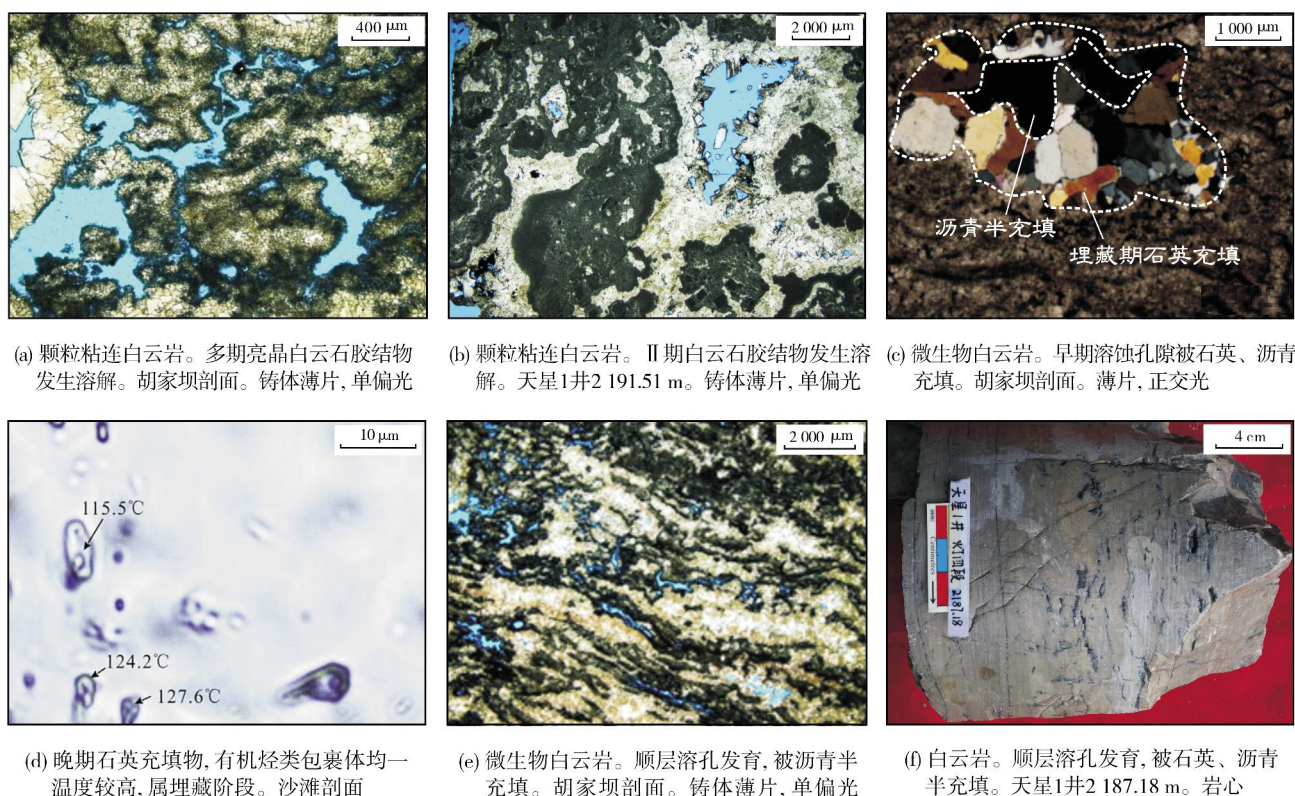


图12 川北地区震旦系灯影组四段埋藏溶蚀特征

川北地区灯四段野外剖面及钻井岩心中都保留了大量埋藏溶蚀的证据:发育了大量拉长状顺层溶孔(图12e, 12f);埋藏溶蚀对早期表生期溶孔或其他孔隙中重结晶晶体的不规则溶蚀(图12a, 12b);伴随酸性流体的硅质组分在顺层溶孔边缘或内部析出结晶,且石英中有机烃类包裹体具有较高的均一温度,反映成岩环境处于埋藏阶段(图12c, 12d);在现今保留的孔隙中,大量沥青充填并阻碍白云石重结晶(图12e)。这些是川北地区灯四段所特有的,也是灯四段保存大量溶蚀孔隙的原因。

灯四段埋藏溶蚀作用强于灯二段,这与灯四段特殊的沉积背景密切相关,其岩溶模式如图13。研究

区灯影组上覆巨厚的筇竹寺组泥质烃源岩,西侧的绵阳—长宁拉张槽中分布有较厚的麦地坪组烃源岩。在埋藏过程中,有机质向液态烃转化过程中释放出大量有机酸,这些组分与压实地层水一起侧向或向下运移至灯四段,远离烃源岩则酸性组分会逐渐减少。台地边缘的滩、丘等沉积单元普遍发育颗粒粘连白云岩、微生物白云岩,其中残余孔隙相对发育,这有利于酸性流体的通过,残余孔隙经进一步溶蚀扩大而形成粒间溶孔、粘连格架溶孔、晶间溶孔等主要的孔隙空间。该岩溶模式可指示灯四段储层发育规律:自灯四段顶部向下,由台地边缘到台地内部,储集空间变小,储层质量变差。

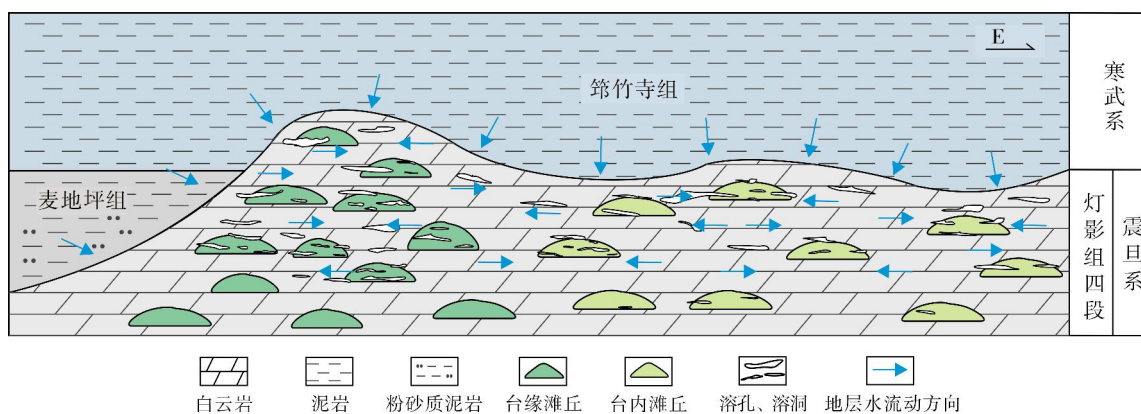


图13 川北地区震旦系灯影组四段埋藏期岩溶模式

4 结 论

(1)川北地区灯影组储层的主要岩石类型为颗粒粘连白云岩、叠层状微生物白云岩和粉晶白云岩,储集空间以次生粒间溶孔、晶间溶孔、格架溶孔及溶洞为主。川北地区灯影组储层类型多样,主要有孔-洞型、孔隙型、孔隙-裂缝型以及溶洞型,它们的发育程度依次降低,但储层质量以孔隙-裂缝型的最佳。

(2)灯影组储层由滩丘沉积和岩溶作用共同控制:滩丘沉积物为储层发育的物质基础;灯二段比灯四段滩丘沉积更发育,经历的表生岩溶改造也更强烈,但灯四段储层物性优于灯二段,埋藏溶蚀是灯四段储层发育的关键。

(3)依据岩溶模式可预测有利储层的发育位置:在潜流带和滩丘沉积体叠加的部位,灯二段储层发育最佳;自顶部向下,自台缘向台内,灯四段储层质量逐渐下降。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,杜金虎,徐春春,等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293.
- [2] 罗冰,杨跃明,罗文军,等. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 416-426.
- [3] 魏国齐,谢增业,宋家荣,等. 四川盆地川中古隆起震旦系—寒武系天然气特征及成因[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 702-711.
- [4] 谢增业,魏国齐,李剑,等. 中国海相碳酸盐岩大气田成藏特征与模式[J]. 石油学报, 2013, 34(增刊1): 29-40.
- [5] 杨雨,黄先平,张健,等. 四川盆地寒武系沉积前震旦系顶界岩溶地貌特征及其地质意义[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 38-43.
- [6] 汪泽成,姜华,王铜山,等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 305-312.
- [7] 刘宏,罗思聪,谭秀成,等. 四川盆地震旦系灯影组古岩溶地貌恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 283-293.
- [8] 周进高,张建勇,邓红婴,等. 四川盆地震旦系灯影组岩相古地理与沉积模式[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 24-31.

- [9] 姚根顺,郝毅,周进高,等. 四川盆地震旦系灯影组储层储集空间的形成与演化[J]. 天然气工业,2014,34(3): 31-37.
- [10] 斯春松,郝毅,周进高,等. 四川盆地灯影组储层特征及主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(3): 266-273.
- [11] 单秀琴,张静,张宝民,等. 四川盆地震旦系灯影组白云岩岩溶储层特征及溶蚀作用证据[J]. 石油学报,2016,37(1): 17-29.
- [12] 刘树根,王一刚,孙玮,等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2016,43(1): 1-23.
- [13] 刘树根,孙玮,罗志立,等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(5): 511-520.
- [14] 冯明友,强子同,沈平,等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系灯影组热液白云岩证据[J]. 石油学报,2016,37(5): 587-598.
- [15] 冯明友,伍鹏程,鄢晓荣,等. 四川峨边震旦系灯影组三段泥页岩地球化学特征及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,2017,36(3): 493-501.
- [16] 张杰,BRIAN J,潘立银,等. 四川盆地震旦系灯影组葡萄状白云岩成因[J]. 古地理学报,2014,16(5): 715-725.
- [17] 林孝先,彭军,闫建平,等. 四川盆地震旦系灯影组葡萄状白云岩成因讨论[J]. 古地理学报,2015,17(6): 755-770.
- [18] 彭瀚霖,刘树根,宋金民,等. 川北米仓山地区灯影组微生物碳酸盐岩发育特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(2): 181-191.
- [19] 施泽进,梁平,王勇,等. 川东南地区灯影组葡萄石地球化学特征及成因分析[J]. 岩石学报,2011,27(8): 2263-2271.
- [20] 朱光有,张水昌,梁英波,等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造:四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. 岩石学报,2006,22(8): 2182-2194.
- [21] 李晓静,王振宇,张云峰,等. 塔中隆起上奥陶统埋藏溶蚀特征及发育模式研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2011,13(3): 17-20.
- [22] 管宏林,王恕一,蒋小琼. 普光气田埋藏溶孔特征及识别标志[J]. 天然气工业,2010,30(3): 31-34,128.

编辑:董庸

Characteristics and controlling factors of the reservoir of Sinian Dengying Formation in northern Sichuan Basin

JIANG Hang, ZENG Deming, WANG Xingzhi, FENG Mingyou

Abstract: Dolomite reservoir of Sinian Dengying Formation in northern Sichuan Basin, an important field for following exploration, some issues about that need to be studied. Based on petrology observation and experimental analysis, it is shown that reservoirs mainly developed in rocks such as particle adhesion dolomite, laminated microorganism dolomite, and grained dolomite in Dengying Member-2 and Member-4, with major reservoir spaces of secondary dissolution pores and vugs. Among the four types of reservoirs including pore-vug, pore, pore-fracture, and vug, the reservoir quality of pore-fracture type is the best. As for the development of dolomite reservoir in Dengying Formation, the sediment of mound-shoal facies is the material basis, and the reconstruction of diagenesis is the key element. The total thickness of mound-shoal sediment of Member-2 is bigger than that of Member-4, but the porosity and permeability of Member-2 is smaller. Based on macroscopic evolution and microscopic pore features of the reservoir, two models are setup for Member-2 and Member-4 respectively. The epigenetic karstification is predominant in Member-2 with the cementation of dolomites and the filling of slim sediments from overlying strata, while the burial dissolution is predominant in Member-4 with extensive dissolution accompanied by recrystallization and the filling of silicoide and asphalt in dissolution pores. According to the models, the good reservoirs in Dengying Member-2 develop at the overlap parts of hyporheic zone and mound-shoal, and the reservoirs in Member-4 go poor towards the inner part of the carbonate platform, and towards the lower part of the member.

Key words: Sinian; Dengying Formation; dolomite reservoir; controlling factor; karst pattern; northern Sichuan Basin

JIANG Hang: Master in progress at Southwest Petroleum University. Add: No. 8 Xindu Avenue, School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China