

湘鄂西地区下寒武统石龙洞组古岩溶发育及储层特征

冯菊芳, 林娟华, 田海芹, 沃玉进, 朱东亚

中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 四川盆地下寒武统龙王庙组天然气勘探近期取得的重大发现, 引起了对同期沉积的石龙洞组的广泛关注。通过对鄂西渝东—湘鄂西地区石龙洞组多个野外露头的研究, 观察到在平面上石龙洞组顶部存在典型的风化岩溶现象, 推测在该区内存在与早寒武世末兴凯运动有关的区域性岩溶不整合面。以湖北恩施咸丰背斜庙梁子—丁寨剖面为例, 石龙洞顶部的表层岩溶带厚度为3 m, 主要为风化壳层和垮塌角砾岩层。同时, 受大气淡水及裂缝影响, 表层岩溶带下部地层在较深范围内都受到大气淡水淋滤作用影响, 属于岩溶改造带。根据胶结物类型及溶蚀特征可分为大气淡水垂向渗滤溶蚀区及潜流溶蚀区。此外, 初步探讨了表生岩溶与储层发育的关系。研究区整体岩性较致密, 但局部存在优质储层, 尤其是表层岩溶带孔洞发育十分丰富, 连通性良好。而岩溶改造带由于后期埋藏阶段成岩作用的影响, 尤其是晚期硅化作用的破坏, 现存孔洞相对较少。研究区优质储层的形成主要受表生及埋藏期溶蚀作用和白云化作用控制。

关键词 石龙洞; 岩溶; 储层

四川盆地下寒武统龙王庙组在磨溪地区获工业气流, 优质储层主要分布在经过早期岩溶改造的颗粒滩相沉积中, 为四川盆地及周缘的勘探提供了新的领域^[1]。鄂西渝东地区位于四川盆地东缘, 在构造区划上, 跨接四川盆地川东高陡构造带与鄂渝过渡构造带, 自西向东依次包括方斗山复背斜、石柱复向斜、齐岳山复背斜、利川复向斜4个次级构造单元, 构造主体主要受方斗山断层和齐岳山断层控制。早寒武世梅树村期和筲竹寺期海平面上升, 成为中国南方早古生代最大海泛期, 也是扬子陆块南、北侧两海盆范围最大的时期, 广泛发育了牛蹄塘组(水井沱组)黑色岩系沉积建造, 形成了下古生界的主力烃源岩^[2-4]。从早寒武世沧浪铺期开始发生海侵, 到下寒武统晚期, 即石龙洞组沉积时期, 上扬子地区已逐渐发展为巨大的碳酸盐缓坡, 整体形成一个由西向东加厚的碳酸盐沉积楔形体。近古陆的川西南—滇中地区为含陆缘碎屑的潮坪相碳酸盐岩, 厚20~100 m; 向东至黔东—湘西在300 m以上。四川盆地以沉积内缓坡相白云岩为主, 川东南长宁—綦江—垫江南一带古地貌相对低洼处形成一个较大型的盐化泻湖, 水体局限, 盐度高, 蒸发作用强烈, 沉积了一套几十米甚至上百米的膏盐岩。围绕泻湖的边缘地区, 形成相对高能的内缓坡或浅滩, 发育颗粒云岩或颗粒灰岩。另外, 在内缓坡内部的局部高地、内、外缓坡折带处也是高能

带浅滩较发育的部位^[1,5-7]。

根据前人研究, 江汉平原及邻区海相碳酸盐岩的部分剖面及钻井观察到表生岩溶现象。盛贤才等^[8]在鄂北京山惠亭山一带观察到了明显的古岩溶作用, 剖面上可划分出渗流带、水平潜流带和深部缓流带, 渗流带厚2.8~5.0 m, 以泥、粉晶云岩、砾屑云岩中发育宽度不等的裂缝为特征, 被方解石脉充填或半充填; 水平潜流带厚4.0~7.5 m不等, 岩溶角砾岩发育; 深部缓流带与基岩过渡, 以鲕粒云岩为主, 仅受微弱溶蚀。牛晓燕等^[9]观察到宜昌莲沱王家坪剖面、石柱彭水板凳沟剖面, 以及典型钻井利1井的石龙洞组剖面发育较为典型的表生岩溶作用。利1井取心井段石龙洞组角砾云岩较发育, 亦为储集岩之一, 石龙洞组孔隙度主要集中在4%~12%, 占总样品的65%; 渗透率则集中于 $0.01 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 约占总样品数的50%。此外, 重庆彭水廖家槽剖面观察到石龙洞组与上覆高台组之间的不整合面, 其下溶蚀孔洞层发育, 表生岩溶特征不明显; 重庆秀山溶溪剖面也观察到石龙洞组典型的风化岩溶改造带及岩溶发育带, 储层孔隙及裂缝发育(内部未发表资料, 剖面位置见图1)。因此, 早寒武世末期, 在经历了短暂的浅埋藏成岩作用之后, 鄂西渝东—湘鄂西区内很可能存在一次由于相对海平面下降造成的时间相对较长的台地暴露过程。但是, 对于典型暴露岩溶的特征、发生

收稿日期: 2015-04-03; 修回日期: 2015-08-31

基金项目: 国家重大科技专项(2011ZX05005-002-002)

作者简介: 冯菊芳, 工程师, 研究方向为碳酸盐岩储层, 电子信箱: fengjf.syky@sinopec.com

引用格式: 冯菊芳, 林娟华, 田海芹, 等. 湘鄂西地区下寒武统石龙洞组古岩溶发育及储层特征[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 121-128; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.019

的范围及分布、对储层的发育影响未有详细研究。本课题组研究区内多个石龙洞组野外露头, 观察典型的表生岩溶标志, 探讨表生岩溶与储层发育的关系。

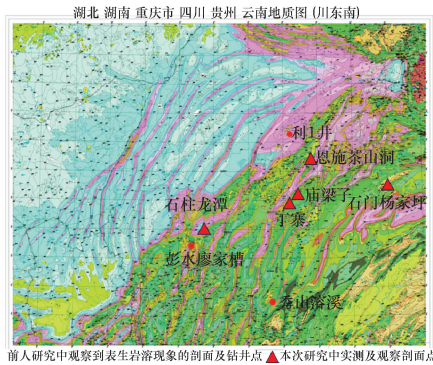


图1 鄂西渝东—湘鄂西地区构造区划及研究区剖面位置
Fig. 1 Geological setting of Eastern Hubei-Chongqing and Western Hunan-Hubei area and locations of cross-sections

1 石龙洞组顶部暴露岩溶分布及特征

为了研究鄂西渝东—湘鄂西地区石龙洞组岩溶发育情况及储层特征, 野外实测了湖北恩施咸丰背斜庙梁子—丁寨剖面以及重庆石柱马武—龙潭剖面, 并对这两条剖面进行了系统采样分析。同时, 对湖南石门杨家坪剖面以及湖北恩施茶山洞剖面进行了详细观察及采样记录(图1)。根据野外宏观观察描述, 石龙洞组下伏底板层为天河板组粉砂质泥岩。石龙洞组岩性主要为亮晶生屑灰岩、颗粒灰岩、泥粉晶灰岩、亮晶生屑白云岩、泥粉晶-细粉晶白云岩、白云角砾岩等。白

云岩与灰岩在垂向剖面上交替出现。石龙洞上覆封盖层为中寒武高台组石英砂岩, 底部溶孔发育, 说明在石龙洞组沉积后发生了相对海平面的下降, 在海陆过渡带发育陆相碎屑岩沉积。

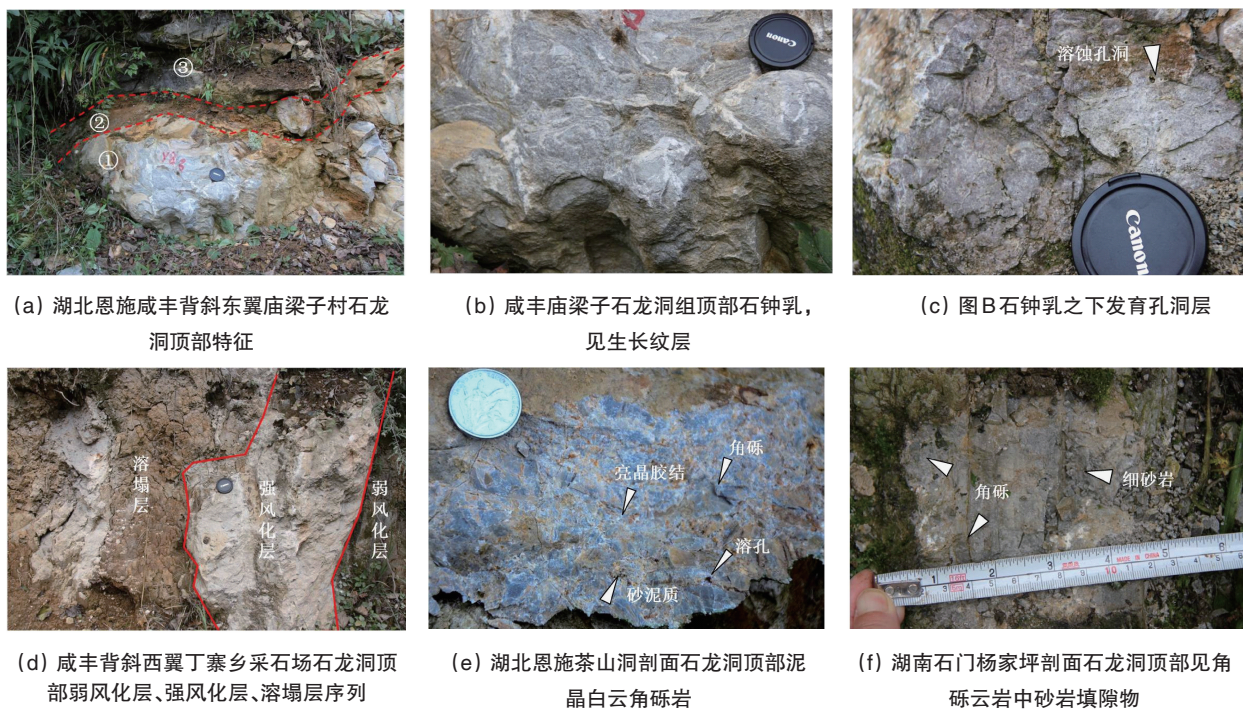
鄂西渝东—湘鄂西地区的宏观及微观岩石学特征表明, 多个剖面的石龙洞剖面顶界存在典型的表生岩溶现象及古喀斯特地貌特征, 说明表生岩溶现象在平面上分布较广。表层岩溶带通常分布在顶部几米的范围内, 以风化壳及垮塌角砾岩层为标志。

1.1 宏观特征

湖北恩施咸丰背斜东翼庙梁子村, 石龙洞顶部依次发育石钟乳层、风化黏土层, 向上进入高台组中层状含泥质砂岩, 如图2(a); 石钟乳的直径约为10 cm, 内部见生长纹层, 钟乳单个纹层厚约为1 mm, 如图2(b), 该特征可作为识别喀斯特化的一个重要特征; 石钟乳层下部岩层溶蚀孔洞发育, 如图2(c)。在咸丰背斜西翼丁寨乡采石场, 石龙洞组上部剖面发育完整, 并见顶部暴露岩溶的典型特征, 向上清晰观察到由基岩、弱风化层、强风化层、溶塌层、顶部黏土层的变化特征, 如图2(d)。

湖北恩施茶山洞剖面石龙洞顶部泥晶白云角砾岩发育, 角砾多呈棱角状—次棱角状, 也有次圆状, 大小在毫米级至1 cm之间不等, 分选差。砾间被亮晶方解石胶结, 砾间及洞穴中混有陆源砂泥质充填, 见溶孔发育, 见图2(e)。这种类型的角砾岩多形成于喀斯特垮塌作用^[10]。

湖南石门杨家坪剖面石龙洞顶部亦见到角砾云岩发育, 其中见砂岩填隙物, 如图2(f)。



(a) 湖北恩施咸丰背斜东翼庙梁子村石龙洞顶部特征
(b) 咸丰庙梁子石龙洞组顶部石钟乳, 见生长纹层
(c) 图B石钟乳之下发育孔洞层
(d) 咸丰背斜西翼丁寨乡采石场石龙洞顶部弱风化层、强风化层、溶塌层序列
(e) 湖北恩施茶山洞剖面石龙洞顶部泥晶白云角砾岩
(f) 湖南石门杨家坪剖面石龙洞顶部见角砾云岩中砂岩填隙物

图2 野外剖面表生岩溶作用宏观特征

Fig. 2 Macroscopic features of epigenic karstification in outcrops

1.2 微观特征

镜下亦观察到各剖面中典型的古喀斯特常见特征:咸丰庙梁子及丁寨剖面中,白云角砾岩的砾间及裂缝被多世代的粒状方解石或白云石胶结物充填,宽度不等,如图3(a)、(c)。此外,裂缝及孔洞中混有陆源碎屑充填,包括铁泥质条带(图3(a))、棱角状石英砂岩角砾(图3(b))、砂泥质碎屑等。溶蚀孔洞发育,包括圆形、椭圆状或不规则状,部分被方解石或泥质充填。发育溶沟、扩溶、裂隙、网状结构等;薄片观察见与去白云化作用有关的圈层结构特征,如图3(c),早期形成的粒状白云石从中央开始溶解,充填后期方解石胶结物,该作用通常与水体淡化作用有关。

杨家坪剖面中,泥晶白云岩角砾间见大量陆源石英砂,

白云岩角砾大小不一,分选性差,呈棱角-次棱角,部分呈次圆状;角砾周围见少量白云石、方解石胶结物残余;石英颗粒表面光洁,磨圆度好,分选性中等,为典型的陆源碎屑沉积石英(图3(d))。阴极发光观察发现,白云岩角砾及裂缝中的亮晶方解石通常不发光(图3(e)、(f))。根据前人研究,影响碳酸盐岩矿物阴极发光特征的主要因素为激活剂和岩石产状,主要受 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 含量,以及 Mn^{2+}/Fe^{2+} 值的综合控制。一般在氧化成岩环境中,由于富 Fe^{3+} 而缺少 Fe^{2+} , Mn^{2+} 的含量也很少,方解石的晶格中没有 Fe^{2+} 的加入,这时常形成不含铁的方解石。在阴极发光偏光显微镜下,这种缺 Fe^{2+} 又少 Mn^{2+} 的方解石发光昏暗,这是表生作用带大气淡水淋滤下形成的方解石的发光特征^[11]。

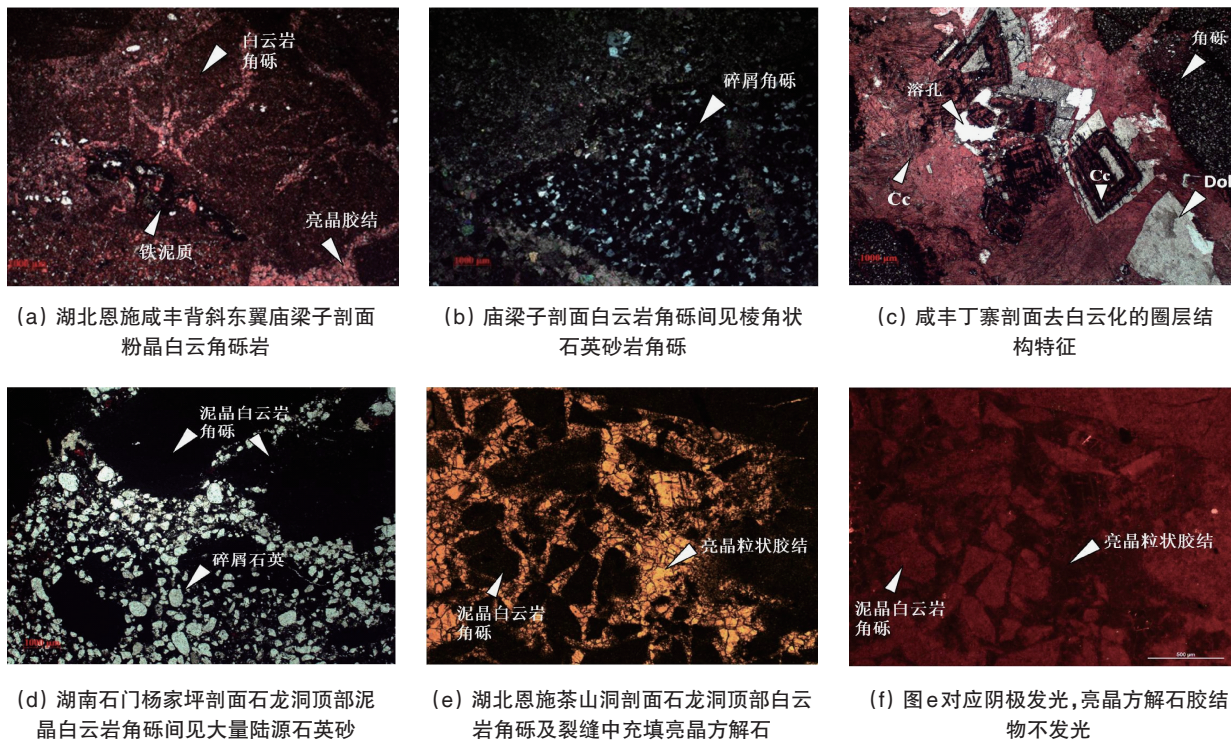


图3 野外剖面表生岩溶作用微观特征

Fig. 3 Microscopical features of epigenic karstification in outcrops

1.3 纵向岩溶特征

石龙洞组地层在抬升裸露地表期间,在大气降水的长期淋滤作用下,表层碳酸盐岩和蒸发岩类发生强烈溶蚀,形成风化壳和垮塌角砾岩这类典型的古喀斯特地貌特征。同时,在纵向剖面上几百米的深度内观察到了大气淡水的溶蚀现象(图4),可能由于表生阶段,由于裂缝及洞穴为流体提供了良好的通道,大气水在垂向上下渗到大范围的基岩内发生溶蚀,对地层形成强烈的改造作用。大气淡水的溶蚀作用也可能发生于同生暴露阶段。对实测咸丰庙梁子—丁寨剖面的纵向综合研究,认为表层岩溶带下部地层存在较深的大气淡水作用影响带。

地表以下、最高潜水面以上主要受大气淡水垂向渗滤溶蚀作用^[12]。在表层岩溶风化带下观察到顺层发育的溶孔,形状有三角形、菱形、平行四边形等,地层发生揉皱,可能为含膏层发生淋滤溶蚀的残余体,如图4(a);地层内见示顶底构造,圆形生物体腔溶孔发育,底部填充渗滤晶体粉砂,顶部为后期粗晶方解石胶结物,如图4(b);此外,见纹层状泥粉质,局部见渗流粉砂痕迹。大气淡水潜流溶蚀作用发生于地下水水位以下,溶解带内易形成铸模孔;孔隙水充满所有孔隙,因此所产生的胶结物不同,易迅速发生各种胶结作用形成晶簇^[10]。剖面观察到的主要标志包括圆形生物体腔溶孔及扩溶缝内发育犬牙状等厚环边粒状胶结物,见图4(c)和(d)。

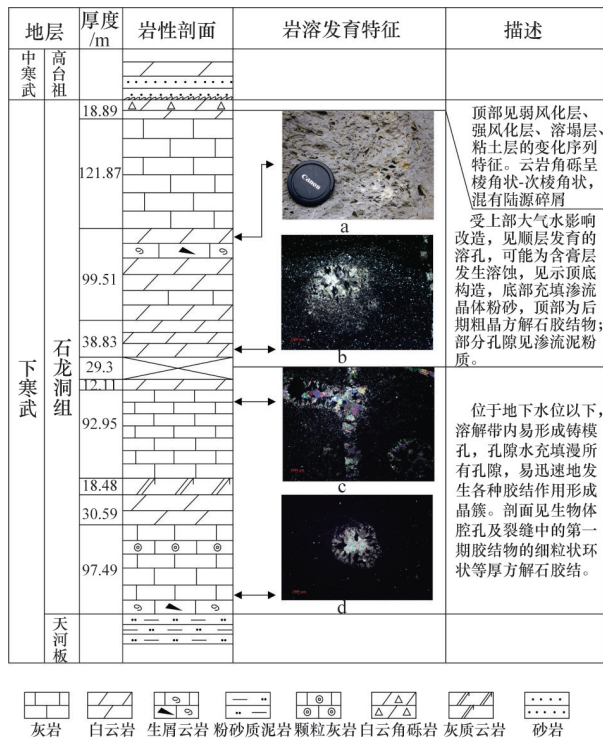


图4 湖北恩施咸丰庙梁子—丁寨剖面岩溶纵向特征
Fig. 4 Vertical karstification features in Miaoliangzi-Dingzhai cross section in Enshi, Hubei Province

2 岩溶储层特征

2.1 储集空间类型

通过对鄂西渝东—湘鄂西地区石龙洞组储层的普通、铸体及阴极发光薄片分析研究，石龙洞组储层主要岩石类型为粉—细晶白云岩、亮晶颗粒灰岩、角砾云岩等。储集空间以粉—细晶白云岩的晶间孔、晶间溶孔（或晶内溶蚀微孔隙）为主，如图5(a)。晶间孔多见于半自形—自形白云石晶粒之间，大小一般0.01~0.05 mm，具有一定连通性，是石龙洞组粉晶云岩常见的储集空间类型；晶间溶孔是在晶间孔基础上，后期发生溶蚀作用扩大而成，孔隙边缘具溶蚀的港湾状，这类孔隙是粉晶云岩及细晶白云岩中主要储集空间。颗粒灰岩的粒间孔、粒间溶孔也较常见，如图5(b)；未完全充填的膏盐及白云石铸模孔以及未充填的裂缝及扩溶缝也是储层孔隙重要组成部分，如图5(c)。另外还有少量粒内残余溶孔，如图5(d)，此类溶孔多与早期大气淡水溶蚀有关。

2.2 成岩作用及孔隙演化

同生成岩阶段，沉积物经历了早期海底胶结作用、泥晶化作用及准同生白云岩化作用。早期海底胶结作用表现在颗粒周缘纤状等厚环边胶结结构，如图6(a)，泥晶化作用是颗粒及生物碎屑发生沉积后，由于藻类及细菌在颗粒表面钻孔生长形成泥晶套，如图6(c)。泥晶套的形成有利于粒内溶孔、铸模孔的形成。在柱状剖面中，这类溶孔多已被后期充

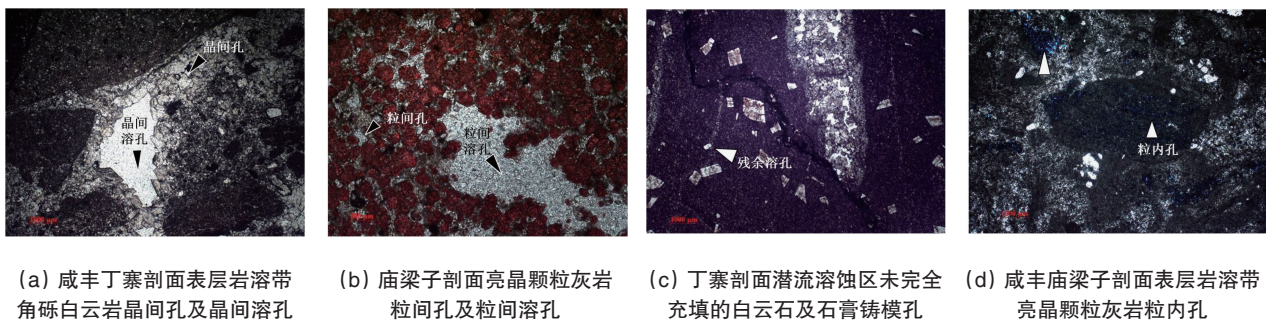


图5 湘鄂西地区石龙洞组主要储集空间类型

Fig. 5 Main reservoir space types in Shilongdong Formation in Western Hunan-Hubei area

填改造，但仍可见到泥晶套残余。泥晶白云岩层岩性致密，偶见针状石膏，蒸发潮坪环境沉积的早期文石发生准同生白云岩化作用。这一阶段，灰泥及颗粒原始沉积物具有较高的原始孔隙度，灰泥晶间孔在准同生白云岩化作用阶段变化不大，但经历浅埋藏阶段的压实及脱水后，原始孔隙急速减小且连通性较差。颗粒沉积物由于早期海水胶结作用，一定程度上抑制了埋藏压实作用，孔隙度相对较好。

表生成岩阶段，台地经历了抬升暴露溶蚀，除了在风化面上留下暴露溶蚀的证据，部分生物碎屑及鲕粒内部发生溶蚀，一世代纤状胶结物也发生部分溶蚀，早期生物体腔孔内沉积示顶底的渗流砂。地表淡水作用促进了膏溶模孔的发育及扩溶缝的发育，见图6(b)，为后期白云石化流体提供了

有利通道。同时发生早期淡水胶结，溶孔内沉淀粒状方解石胶结物。石龙洞组灰岩层段多见斑状云化作用，尤其发生在泥晶灰岩中。白云石特征为粉细晶自形—半自形结构，镜下白云岩保留生物碎屑结构，部分细晶白云石呈现雾心亮边结构，见图6(e)、(f)。

白云岩化机制可能为混合水成因，形成于表生成岩阶段暴露在海平面以上的台地边缘，易受到海水和淡水混合的影响。白云化流体沿裂缝或缝合线灌入，交代原始灰岩组分，白云石化作用具有选择性，优先交代灰泥基质，部分生物碎屑不被交代或仅局部遭受轻微的交代。当白云岩化流体较弱，其优先交代亚稳定的文石和镁方解石，且灰泥颗粒细小，比表面积大，易于发生交代作用。当白云岩化流体充分，除

灰泥发生优先白云岩化作用,生物骨壳也明显地被选择性白云岩化。但是,对于该成因尚有争议,有学者认为这些特征的白云石形成于埋藏环境,富 Mg^{2+} 地层水在差异压实作用的驱动下,优先沿灰岩裂缝或缝合面进入与其邻近的、具有较高孔、渗的沉积物中,发生白云石化作用。这种差异性压实作用会一直延续到成岩晚期的深埋藏环境^[13]。要清晰厘定其白云岩化成因类型需依托后期地球化学分析。此外,灰岩颗粒内部及胶结物中六方柱状石英发育,阴极发光下不发光,见图6(d),可能为表生阶段形成的自生石英,对孔隙具有一定破坏作用。这一阶段,表生岩溶作用形成了很多溶蚀孔洞,浅滩沉积的储层物性有了很大程度的改善,虽然这些溶蚀孔在早期淡水和后期埋藏环境下多被胶结充填,但是局部地区少量孔隙得以保留。另外,该期作用也为后期埋藏溶蚀提供了基础,镜下观察表明颗粒之间的多期胶结物往往是后期埋

藏溶蚀作用的对象,优先发生溶蚀形成粒间孔洞。

埋藏成岩阶段,颗粒发生破碎压实作用,见图6(c),缝合线发育。同时由于埋深不断增加,持续发生埋藏白云岩化作用及方解石白云石晶体的重结晶作用。镜下观察到粗晶粒状方解石充填粒间孔及裂缝,粗晶方解石内部见后期溶蚀孔,见图6(c)、(d),说明胶结与溶蚀作用不断发生。埋藏白云岩化形成的白云石晶体多呈粉晶—细晶,具有自形菱面体漂浮状或松散状的镶嵌结构,晶体较明亮。在部分薄片可观观察到,具有雾心亮边结构的自形细晶白云石漂浮于中-粗晶白云石晶体中,见图6(e)、(f),说明在局部孔渗条件较好的部位发生埋藏白云石化作用,并且在后期叠加了重结晶作用。此外,硅化流体沿多孔层发生充填交代,埋藏溶蚀孔隙部分遭到破坏。这一阶段,埋藏压实及胶结作用破坏了先存溶蚀孔隙,但是也溶蚀形成了许多现存孔隙。

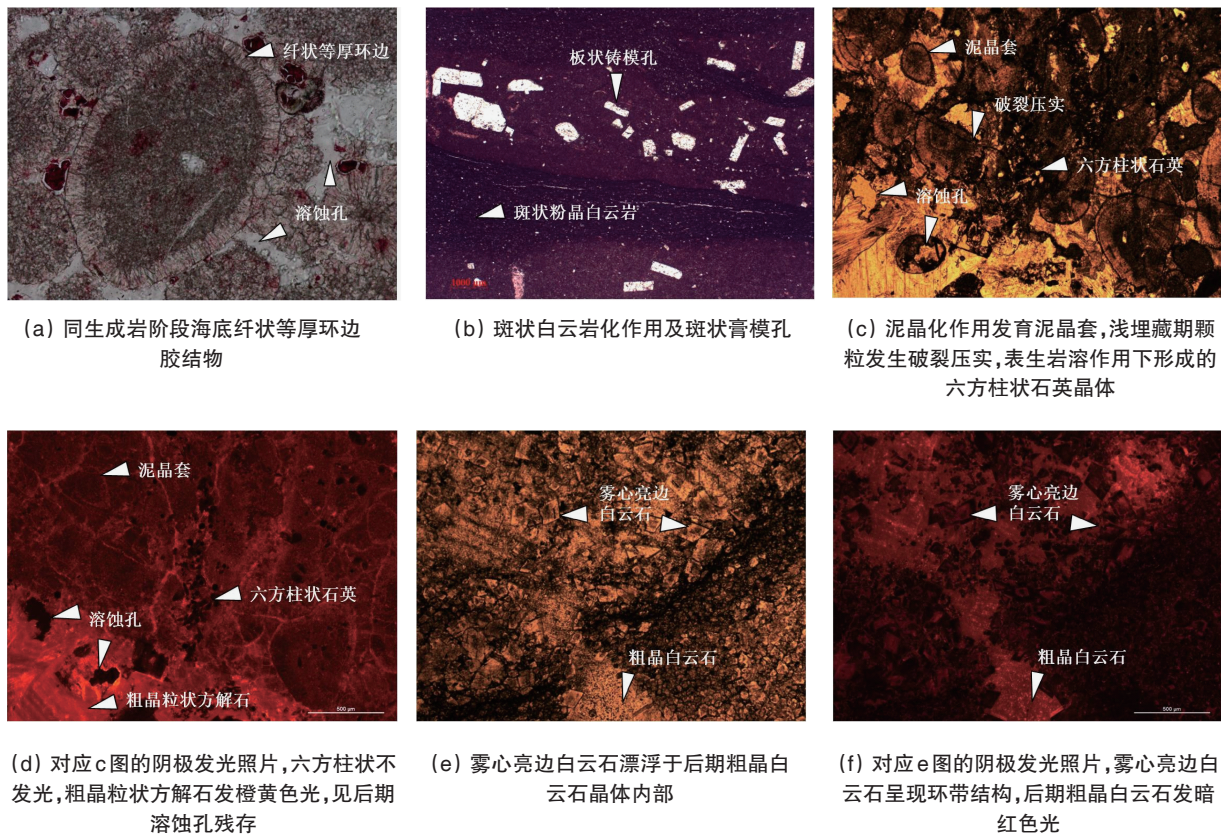


图6 湘鄂西地区石龙洞组成岩作用及孔隙演化微观特征

Fig. 6 Diagenesis and pore evolution of Shilongdong Formation in Western Hunan-Hubei area

2.3 储层形成主控因素

储层特征综合研究表明,研究区整体岩性较致密,但是局部存在优质储层,尤其是表层岩溶带孔洞发育十分丰富,连通性良好;而岩溶改造带由于后期埋藏阶段成岩作用的影响,尤其是晚期硅化作用的破坏,孔洞相对发育较少。优质储层的形成主要受表生及埋藏期溶蚀和云化作用控制。首先,浅滩相颗粒灰岩及白云岩、角砾白云岩储层具有较好的

孔渗性能,潮坪或泻湖沉积的泥粉晶灰岩及白云岩相对储层物性差。这说明原始沉积相为储层的发育提供了物质基础,控制着岩石的岩性、结构和沉积构造,从而控制原生孔隙的发育程度,并在很大程度上影响成岩作用的发生和演化。其次,同生期尤其是表生期的大气淡水溶蚀作用在优质储层形成的过程中起到了至关重要的作用,除了溶蚀颗粒及早期胶结物,潮坪沉积环境下形成的针状、板状的蒸发易溶矿物也

发生了一定程度的溶蚀,形成了孔隙型储层,并为后期扩溶形成优质储层提供了先决条件,对石龙洞储层具有重要的改良作用。此外,表生及埋藏阶段的白云石化作用使得晶间孔更为发育,同时提高了抗压实作用,原生孔隙更易得以保存,这使得粉细晶白云岩的孔隙发育明显高于泥粉晶灰岩。最后,埋藏阶段的溶蚀作用,增加了晶间溶蚀孔、粒内溶孔以及扩溶缝,对现存孔隙是很大的贡献。因此,优质储层的发育是原始沉积相、表生埋藏岩溶作用共同作用的结果。

3 讨论

3.1 表生岩溶时间

加里东期多幕式构造运动中,桐湾运动、兴凯运动是区内重要的造陆运动,而广西运动除周边的江南—雪峰和北秦岭为造山形变外,区内表现为造陆隆升^[14]。虽然早寒武世晚期是全球海平面上升时期,但区内总体表现出台地暴露及古岩溶作用的影响,显示出构造沉降减弱甚至出现构造隆升作用,形成了区内分布范围较大的表生岩溶作用,进而影响优质储层的发育。因此,区内表生暴露岩溶的发生机制,很可能与早寒武世末的兴凯运动有关。目前学术界对于兴凯运动发生的时间尚存在争论。黄汲清等^[15]研究认为,经过中元古代末至新元古代的扬子造山旋回(1100~700 Ma B.P.),中国境内形成了范围辽阔的扬子准地台,很可能与早先形成的中朝准地台连成一体,构成一个巨大的“古中国地台”。新元古代中期到早寒武世,该地台解体,形成了昆仑、秦岭、北山、天山等地槽,同时在中国东北、西南等地发生褶皱,被命名为“兴凯旋回”(700~536 Ma B.P.)。王剑等^[16]从华南裂谷盆地演化观点出发,通过野外调查分层对比,认为新元古代中、晚期发生的兴凯地裂运动产生的裂谷和隆起控制了沉积相,并认为裂谷发育延续,至中奥陶世末的郁南运动,兴凯运动结束。近来,有学者依据大量二维、三维精细地震资料标定、解释和连井分析,认为在四川盆地西部地区发现了兴凯地裂运动形成的震旦纪至早寒武世绵阳—乐至—隆昌—长宁拉张槽,并划分了拉张槽的5个演化阶段:拉张孕育阶段(灯影组沉积末期)、拉张初始阶段(麦地坪组沉积期)、拉张高潮阶段(筇竹寺组沉积期)、拉张衰弱阶段(沧浪铺组沉积期)、拉张消亡阶段(龙王庙组沉积期)^[17-19]。兴凯运动与全球性的贝加尔运动所描述的内涵是一致的,分为早期的台缘裂陷(地槽发展体制)、和晚期的剧烈褶皱造山两个阶段,中国南方下寒武统沧浪铺组广泛分布的碎屑岩沉积体系,即是晚期褶皱造山的体现。四川盆地震旦纪的裂陷槽与早寒武世裂陷槽边缘烃源岩发育,四川盆地北缘早寒武世的郭家坝组(对应筇竹寺组)为含砂屑的鲕粒灰岩,仙女洞期沉积有巨厚磨拉石建造,与贝加尔构造运动表现相一致。因此,虽然不同学者对兴凯运动发生和结束的时间在认识上存在一定差异,但众多证据表明该期构造运动在早寒武世末对扬子地区存在一定影响。兴凯运动可能引发的褶皱运动及沉降作用,形成了古地

形地貌差,有利于古岩溶的发育。此外,古构造运动有利于古裂缝的发育,对大气淡水淋滤作用提供有利通道。

3.2 表生岩溶影响深度及范围

鄂西渝东—湘鄂西地区剖面所显示的表生岩溶特征表明,该区内未经历大型喀斯特岩溶洞穴,多形成微喀斯特地貌及小型溶蚀洞穴。在纵向上,岩溶风化带主要局限在地表几米至十几米的范围内。近地表作用包括溶解、陆源碎屑沉积、化学沉淀,以及局部的断裂、角砾化及洞穴垮塌。岩溶作用向下影响范围主要与裂缝发育有关。裂缝发育地区大气淡水淋滤的影响范围较深,在300、400 m的地层中均有溶蚀作用痕迹。裂缝欠发育区岩性致密,储层欠发育。表生岩溶作用形成的溶孔白云岩、渗流带及潜流带的未充填孔洞带、与裂缝有关的岩溶发育区都是有效储层发育有利区域,局部出现的膏溶角砾岩中砾间可发育超大孔隙。在平面上,区内表生岩溶作用分布范围较广,但是各个野外剖面观察到的岩溶影响程度有差异。前人研究认为^[20,21],研究区东北方向的中扬子板块东北缘于早寒武世早期发育一个近东西向链状展布的古隆起带,称为鄂中古陆。但是并未见文献报道兴凯运动在鄂西渝东—湘鄂西区内造成大型古隆起,因此,研究区内的古岩溶发育可能与区内存在的小型古隆起有关,与局部的褶皱运动及沉降作用形成的古地形地貌差有关。表生岩溶的详细平面分布需要依靠后期更精细的地层和构造研究工作来进一步阐述。

4 结论

1) 通过对多个剖面的野外和薄片观察,鄂西渝东—湘鄂西地区石龙洞组发育了一套典型的风化岩溶沉积,在顶部形成表层岩溶带。表层岩溶带厚度为3 m左右,主要分为风化壳层和垮塌角砾岩层。同时,受大气淡水作用和裂缝影响,表层岩溶带下部地层存在较深的大气淡水作用影响带,根据胶结物类型及溶蚀特征又可将大气淡水作用分为垂向渗滤溶蚀及潜流溶蚀作用。

2) 储层特征综合研究表明,研究区整体岩性较致密,但是局部存在优质储层,尤其是表层岩溶带孔洞发育十分丰富,连通性良好。而岩溶改造带由于后期埋藏阶段成岩作用的影响,尤其是晚期硅化作用的破坏,孔洞相对发育较少。优质储层的形成主要受表生及埋藏期溶蚀和云化作用控制。储集空间以粉—细晶白云岩的晶间孔、晶间溶孔(或晶内溶蚀微孔隙)为主,颗粒灰岩的粒间孔、粒间溶孔也较常见,另外还有少量粒内残余石膏铸模孔及未充填裂缝。

3) 本研究成果将鄂西渝东—湘鄂西地区暴露岩溶的范围扩大,可能与区内早寒武世末期较大范围的区域抬升暴露有关,说明该套岩溶储层是下步重要的勘探新领域。

参考文献(References)

- [1] 姚根顺,周进高,邹伟宏,等. 四川盆地早寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J]. 海相油气地质, 2013, 18(4): 1-8.

- Yao Genshun, Zhou Jingao, Zou Weihong, et al. Characteristics and distribution rule of Lower Cambrian Longwangmiao grain beach in Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(4): 1-8.
- [2] 李忠雄, 陆永潮, 王剑, 等. 中扬子地区晚震旦世-早寒武世沉积特征及岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2004, 6(2): 151-162.
- Li Zhongxiong, Lu Yongchao, Wang Jian, et al. Sedimentary characteristics and lithofacies palaeogeography of the Late Sinian and Early Cambrian in middle Yangtze region[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(2): 151-162.
- [3] 李昌鸿. 江汉平原加里东期古隆起对震旦系-下古生界成藏条件的控制作用[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(6): 564-567.
- Li Changhong. Controls of the Caledonian paleouplift to the Sinian-Lower Paleozoic reservoiring conditions in Jianghan Plain[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(6): 564-567.
- [4] 罗顺社, 高振中, 李建明, 等. 湘鄂西地区震旦系至奥陶系有利储集层段的储层特征及分布规律研究[J]. *石油天然气学报*, 2002, 24(4): 4-7.
- Luo Shunshu, Gao Zhenzhong, Li Jianming, et al. Reservoir characteristics and distribution of Sinian to Ordovician in Western Hunan and Hubei[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2002, 24(4): 4-7.
- [5] 郭战峰, 陈绵绵, 付宜兴, 等. 鄂西渝东地区震旦-寒武系天然气成藏条件[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 30(4): 39-42.
- Guo Zhanfeng, Chen Miankun, Fu Yixing, et al. Natural gas reservoiring conditions of Sinian and Cambrian in from Western Hubei to Eastern Chongqing area[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2008, 30(4): 39-42.
- [6] 刘莉. 江汉盆地海相探区中寒武统盐下层勘探潜力浅析[J]. *海相油气地质*, 2011, 16(1): 26-32.
- Liu Li. Exploration potential of Middle Cambrian subsalt formations in marine origin formation area, Jianghan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011, 16(1): 26-32.
- [7] 王必金, 包汉勇, 郭战峰, 等. 湘鄂西寒武系层序划分及其对油气勘探的意义[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(4): 372-377.
- Wang Bijin, Bao Hanyong, Guo Zhanfeng, et al. Sequence stratigraphic division of Cambrian in western Hunan-Hubei and applications for petroleum exploration[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(4): 372-377.
- [8] 盛贤才, 郭战峰, 陈学辉, 等. 江汉平原及邻区海相碳酸盐岩的古岩溶特征及控制因素[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(2): 17-22.
- Sheng Xiancai, Guo Zhanfeng, Chen Xuehui, et al. Palaeokarst characteristics and controlling factors of marine carbonate rocks in Jianghan Plain and its neighboring areas[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(2): 17-22.
- [9] 牛晓燕, 李建明, 李冬冬. 中扬子西部地区石龙洞组古岩溶储层控制因素分析[J]. *石油仪器*, 2010, 24(2): 69-72.
- Niu Xiaoyan, Li Jianming, Li Dongdong. Analyses on fossil karst reservoir controlling factors in Shilongdong formation of Middle Yangtze Western Region[J]. *Petroleum Instruments*, 2010, 24(2): 69-72.
- [10] 马永生. 碳酸盐岩微相——分析、解释及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 191-196.
- Ma Yongsheng. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 191-196.
- [11] 黄思静. 碳酸盐矿物的阴极发光性与其Fe、Mn含量的关系[J]. *矿物岩石*, 1992, 12(4): 74-79.
- Huang Sijing. Relationship between cathodoluminescence and concentration of iron and manganese in carbonate minerals[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1992, 12(4): 74-79.
- [12] 纪友亮, 陈丽华, 涂强, 等. 油气储层地质学[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2009: 111.
- Ji Youliang, Chen Lihua, Tu Qiang, et al. *Petroleum Reservoir Geology* [M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 2009: 111.
- [13] 甯濛, 郝斌斌, 张九园, 等. 混合水白云石化和埋藏白云石化作用的是与非——以四川盆地飞仙关组白云岩成因为例[J]. *地球科学前沿*, 2012(2): 193-198.
- Ning Meng, Hao Binbin, Zhang Jiuyuan, et al. The rationality of mixed water dolomitization and buried dolomitization—Taking the genesis of dolostone of Feixianguan Formation in the Sichuan Basin as an example [J]. *Advances in Geosciences*, 2012(2): 193-198.
- [14] 盛贤才, 王韶华, 文可东, 等. 鄂西渝东地区石柱古隆起构造沉积演化[J]. *海相油气地质*, 2004, 9(1-2): 43-52.
- Sheng Xiancai, Wang Shaohua, Wen Kedong, et al. Tectonics and sedimentology of Shizhu Palaeohigh in Western Hubei-Eastern Chongqing area[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2004, 9(1-2): 43-52.
- [15] 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa, et al. *Geotectonic Evolution of China*[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [16] 王剑, 刘宝珺, 潘桂堂. 华南新元古代裂谷盆地演化——Rodinia超大陆解体的前奏[J]. *矿物岩石*, 2001, 21(3): 135-145.
- Wang Jian, Liu Baojun, Pan Guitang. Neoproterozoic rifting history of South China: Significance to Rodinia breakup[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2001, 21(3): 135-145.
- [17] 钟勇, 李亚林, 张晓斌, 等. 四川盆地地下组合张性构造特征[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 40(5): 498-510.
- Zhong Yong, Li Yalin, Zhang Xiaobin, et al. Features of extensional structures in pre-Sinian to Cambrian strata, Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 498-510.
- [18] 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.
- Liu Shugen, Sun Wei, Luo Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2013, 40(5): 511-520.
- [19] 宋金民, 刘树根, 孙玮, 等. 兴凯地裂运动对四川盆地灯影组优质储层的控制作用[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 40(6): 658-670.
- Song Jinmin, Liu Shugen, Sun Wei, et al. Control of Xingkai taphrogenesis on Dengying Formation high quality reservoirs in Upper Sinian of Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2013, 40(6): 658-670.
- [20] 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xinnan, et al. *Paleo-continental sedimentary evolution and mineralization in South China*[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [21] 田望学, 潘龙克, 江林生. 早寒武世早期鄂中古岛异议[J]. *湖北地矿*, 2001, 15(4): 7-11.
- Tian Wangxue, Pan Longke, Jiang Linsheng. A discussion on "paleo-island of central Hubei" in early stage of Lower Cambrian epoch[J]. *Hubei Geology & Mineral Resources*, 2001, 15(4): 7-11.

Karst development and reservoir characterization of Lower Cambrian Shilongdong Formation in Western Hunan–Hubei area

FENG Jufang, LIN Juanhua, TIAN Haiqin, WO Yujin, ZHU Dongya

Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 100083, China

Abstract Significant gas discovery in the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan basin has received wide attention on the time-equivalent Shilongdong Formation in Western Hunan–Hubei area. In order to provide guidance to the regional evaluation of reservoir in Western Hunan–Hubei area, detailed research has been carried out with methods including observation of outcrop, thin section, casted thin section, and cathode luminescence analysis. Based on the research of several outcrops in Eastern Hubei–Chongqing and Western Hunan–Hubei area, typical weathering crust karst features have been observed. Miaoliangzi–Dingzhai cross section has been chosen as the typical section in Enshi Xianfeng area for detailed research. The surface karstified zone is 3 meters in thickness, composed of weathering layer and collapse breccia layer. The underlying strata have been affected by meteoric water leaching and dissolution due to faults and fracture system. And the meteoric water dissolution reaches as far as hundreds meters. According to the cement types and dissolution features, the vertical seepage flow zone and horizontal subsurface flow zone have been distinguished. Lithology is overall dense in the research area, but high quality reservoir with high porosity and permeability exists in some area, especially in the surface karstified zone. In the vertical seepage flow zone and horizontal subsurface flow zone, pore space is lost due to late silicification, and only minor pore space is preserved. According to the discussion of diagenesis process and reservoir development, high quality reservoir is mainly controlled by supergene karstification, burial dissolution, and dolomitization. It is speculated that regional unconformity karsts are present in the research area, which are related to Xingkai movement during early Cambrian. This research is important to the regional evaluation of reservoir in Eastern Hubei–Chongqing and Western Hunan–Hubei area.

Keywords Shilongdong; karst; reservoir

(责任编辑 刘志远)