

四川盆地东部中二叠统茅口组眼球状石灰岩 储层特征及成因

苏成鹏^{1,2,3}, 谭秀成^{1,2,3}, 王小芳^{3,4}, 李飞^{1,2,3}, 芦飞凡³, 李明隆³, 胡笙³

1 油气藏地质及开发工程国家重点实验室; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学研究分室;
3 西南石油大学地球科学与技术学院; 4 中国石油杭州地质研究院

摘要 眼球状石灰岩长久以来通常被看作一类非油气储集岩类,而且其成因一直颇有争议。通过对 11 条野外剖面的观测以及室内薄片鉴定和物性分析,对川东地区茅口组眼球状石灰岩的岩石学特征和储集性能进行研究,并初步探讨了储层的成因机制。研究发现,眼球状石灰岩“眼球”与“眼皮”宏观、微观特征具有较大差异:“眼皮”部分储渗性能相对较好,储集空间主要为各类次生溶蚀孔隙,孔渗相关性好,为低孔-低渗的孔隙型储层。研究结果表明:在盆地内广泛分布的眼球状石灰岩,可作为油气勘探中的致密灰岩储集体。基于眼球状石灰岩宏观、微观特征,结合前人研究成果,初步认为眼球状石灰岩储层的形成与该类岩石的成岩过程密切相关,早期海水埋藏成岩作用阶段形成的层状组构差异,为后期的暴露岩溶作用奠定了物质基础,沉积后的岩溶作用是储层形成的关键。

关键词 眼球状石灰岩;致密灰岩储层;成岩过程;岩溶作用;茅口组;中二叠统;四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

0 前言

中二叠统茅口组是四川盆地的重要勘探层系,已发现了多个大中型气田^[1-3]。研究表明:茅口组储层包括滩相储层^[4-5]、风化壳古岩溶型储层^[6-7]和白云岩储层^[8-11]。而茅口组中一下部普遍发育的眼球状石灰岩通常被看作非油气储集岩类,因此对眼球状石灰岩储集性能的报道较少。事实上,20 世纪 70 年代中期,就有关于在江苏句容盆地眼球状石灰岩中发现地表油苗的报道,区内东风 3 井、东风 13 井测试分别产油逾 1 t/d 和 2.84 t/d^[12-13]。此后,对于眼球状石灰岩的研究多侧重于其成因机制^[14-17]和生烃潜力^[18-19],而且其成因机制一直存在分歧。

近年来,四川盆地 JY1 井和 YH1 井茅口组一段(茅一段)眼球状石灰岩中测试分别获得 $1.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $3.06 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流,尤其是 2019 年测试的 TT1 井茅一段眼球状石灰岩测试产能逾 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,再

一次表明茅口组眼球状石灰岩具有一定的储集性能和勘探潜力。鉴于此,笔者对川东地区 11 条野外露头剖面进行了踏勘(剖面位置见图 1a),优选了其中 4 条剖面进行了详细的野外观察和描述,并进一步结合室内薄片、扫描电镜和常规物性资料,研究茅口组眼球状石灰岩的储层特征,并初步探讨了其成因。

1 研究区地质背景

四川盆地处于扬子准地台西北部,是扬子准地台的一个次一级构造单元。中二叠统沉积前,四川盆地由加里东构造旋回造就的大隆大坳格局,由于海西早期盆地基底大规模的整体抬升,遭受夷平补齐,使得中二叠统沉积时具有准平原化的基底^[20]。盆地基底古地貌格局与区域海平面升降共同作用,控制了四川盆地中二叠统沉积相带的分布^[21]。梁山期广泛的海侵使中二叠统直接覆盖在石炭系、泥盆系、志留系等不同时代地层的不整合面之上^[22-23]。

收稿日期: 2019-07-20; 改回日期: 2019-08-22; 网络发表日期: 2020-03-03

本文受国家自然科学基金“寒武系第二统至芙蓉统浅水沉积记录中的稀土组成特征及演化规律研究”(编号: 41872119)和四川省省属高校科研创新团队建设计划“非常规油气”(省教专 127)联合资助

第一作者: 苏成鹏,博士研究生,主要从事储层地质学研究,发表论文 10 余篇。通信地址: 610500 四川省成都市新都区新都大道 8 号; E-mail: suchengpeng90@163.com

通信作者: 谭秀成,教授,博士生导师,主要从事储层沉积学研究,发表论文 150 余篇。通信地址: 610500 四川省成都市新都区新都大道 8 号; E-mail: tanxiucheng70@163.com

四川盆地中二叠世茅口组继承了栖霞期海侵的面貌,川东地区茅口组在古地理格局上主要为一套开阔台地相浅水碳酸盐沉积,沉积厚度一般在150~400 m^[24-25]。根据岩性茅口组从底至顶可分为4段(图1b):茅一段为灰色灰岩、泥质灰岩夹黑色页岩,岩石颜色较深,有机质、泥质含量较高,眼球状构造普遍发育,向上眼球状构造呈明显减少;茅二

段为灰色厚层块状泥晶灰岩,泥质含量低;茅三段主要以一套浅灰色、灰白色亮晶生物碎屑灰岩为主,颗粒含量高;茅四段以黑灰色泥晶灰岩、生物碎屑灰岩为主^[26]。中二叠世与晚二叠世之间发生了遍及整个四川盆地的东吴运动,造成了沉积间断以及下伏茅口组上部的风化剥蚀^[27-28]及岩溶改造^[29-31]。

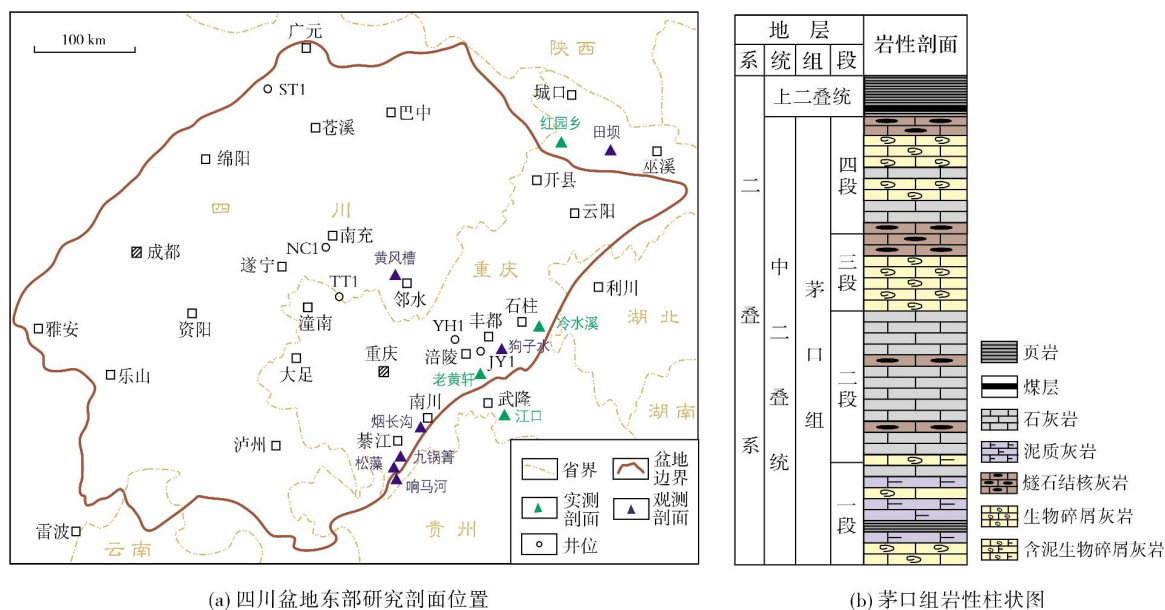


图1 四川盆地东部研究剖面位置和中二叠统茅口组岩性柱状图

Fig. 1 Outcrop location and lithology column of the Middle Permian Maokou Formation in East Sichuan Basin

2 眼球状石灰岩储层特征

2.1 储层岩石学特征

川东地区中二叠统茅口组眼球状石灰岩可划分为“眼球”与“眼皮”2类组构,二者宏观、微观特征均具有较大差异(图2)。

野外露头观察发现,“眼球”的产出形态主要包括3种类型:顺层连续串珠状、顺层断续串珠状(透镜状)和杂乱状,“眼皮”常包绕“眼球”产出(图2a, 2b)。“眼球”颜色较浅(浅灰色—灰色),为成分较纯的石灰岩,泥质含量一般小于5%;发育大量浅水生物,包括藻类、腹足、苔藓虫、蠕虫、非蠕虫有孔虫等,生物碎屑和生物随机分布,排列无定向性,压实作用欠发育(图2c)。相比而言,“眼皮”颜色较深(深灰色—灰黑色),为泥质含量较高的石灰岩,多为含泥石灰岩,呈波状起伏的纹层状;生物化石与“眼球”同等发育,但

也存在一定差异性,如富含介壳碎屑和完整的腕足化石,腕足通常具有壳刺和较强的壳饰(图2d);受压实作用改造较强,常见粗枝藻被压扁后呈定向排列,局部藻体甚至被压成直线(图2c)。

镜下观察表明:“眼球”中颗粒大多保存完好,没有被压实的迹象,甚至易碎的米齐藻和始角藻等粗枝藻属也保存完好(图2e),颗粒间充填灰泥和微亮晶方解石(图2e, 2f),部分“眼球”明显受到岩溶作用的影响(图2f)。与之相比,“眼皮”中除了腕足、有孔虫等部分方解石质化石保存完好外,其他生物碎屑通常保存得不完整,很少发现成对的介形虫壳体,生物碎屑颗粒大多细小而无法辨认种属,排列常常具有一定的定向性(图2g, 2h),可见粗枝藻被明显压扁(图2i)。颗粒之间同样是灰泥充填,但是灰泥中多残留泥质和沥青等不溶物,局部发育岩性与“眼球”岩性一致的未被溶解的微晶方解石集合体(眼球岩屑)(图2g)。

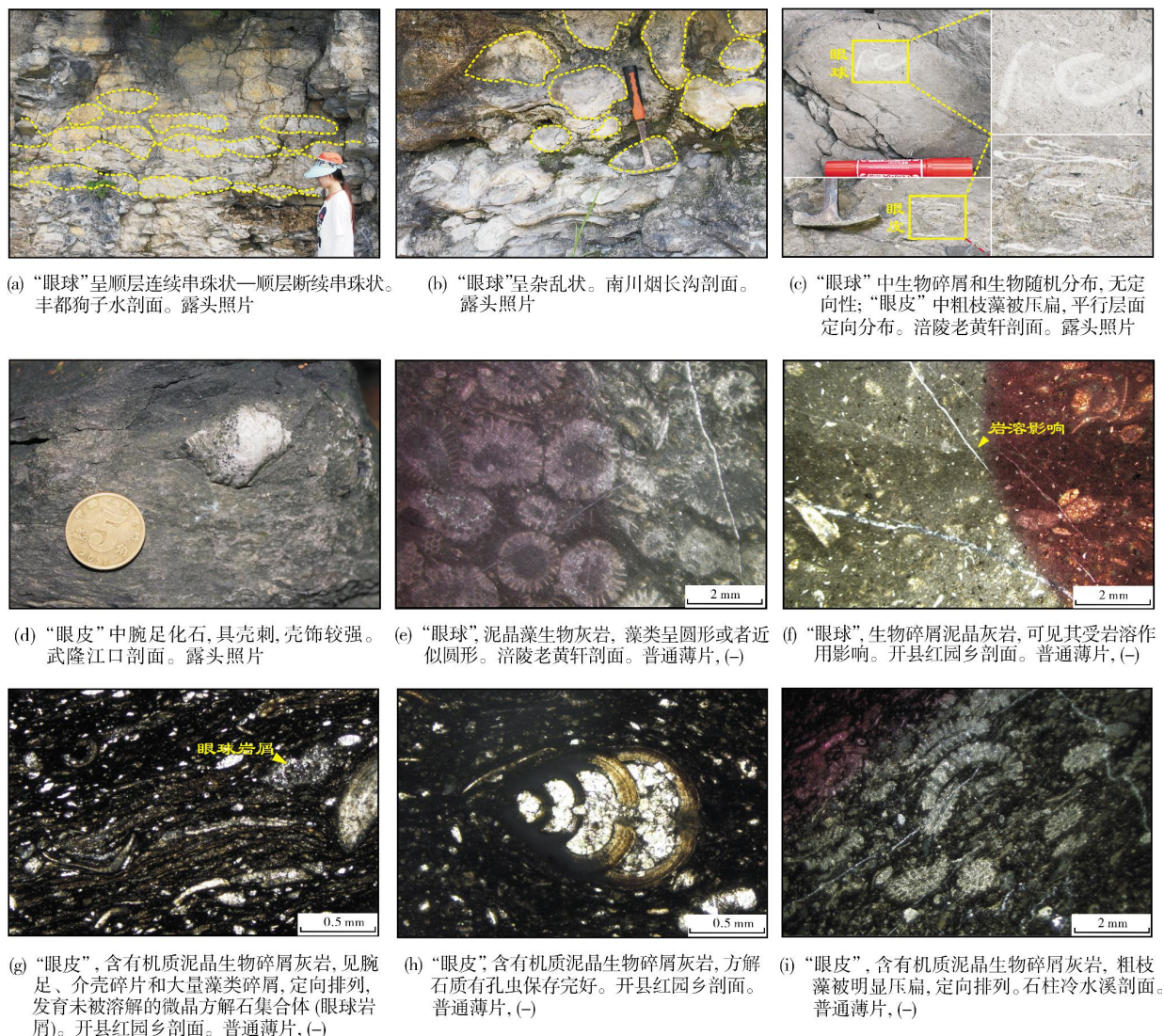


图2 四川盆地东部中二叠统茅口组眼球状石灰岩特征

Fig. 2 Characteristics of eyeball limestone of the Middle Permian Maokou Formation in East Sichuan Basin

2.2 储集空间类型

通过对川东地区4条野外实测剖面(图1a)的105张茅口组眼球状石灰岩薄片和10件扫描电镜样品的详细观察,发现研究区茅口组眼球状石灰岩储层的储集空间复杂、类型多样,主要为各类次生孔隙,包括次生的基质溶孔、晶间溶孔、溶缝、缝合线和张裂缝等,非均质性极强,且“眼球”和“眼皮”在各类次生孔隙的发育程度方面表现出明显不同的特征(图3)。

“眼球”岩性致密(图3a),次生溶蚀孔隙不发育,仅发育少量缝合线和张裂缝。其中,缝合线多被沥青充填,张裂缝多被白色方解石全充填(图3b),局部偶

见半充填张裂缝,方解石晶间孔见残余沥青(图3c)。

“眼皮”岩性疏松多孔,不仅发育缝合线和张裂缝,还大量发育各类次生溶蚀孔隙。其中,基质溶孔极为发育,孔隙形态不规则,边界不平整,孔径分布范围较广,最大可大于1 mm,最小可低至0.01 mm以下,多为有机质和黏土矿物半—全充填(图3d-3f),亦可见未充填的基质溶孔(图3g);张裂缝中充填的方解石晶体,常发育晶间溶孔和溶缝,相较于基质溶孔,晶间溶孔孔隙形态为较规则的多边形,孔径0.01~0.5 mm不等,溶缝宽为0.01~0.25 mm,二者皆多与沥青伴生(图3h);此外,生物碎屑粒内溶孔偶有发育,孔径为0.1~0.5 mm(图3i)。

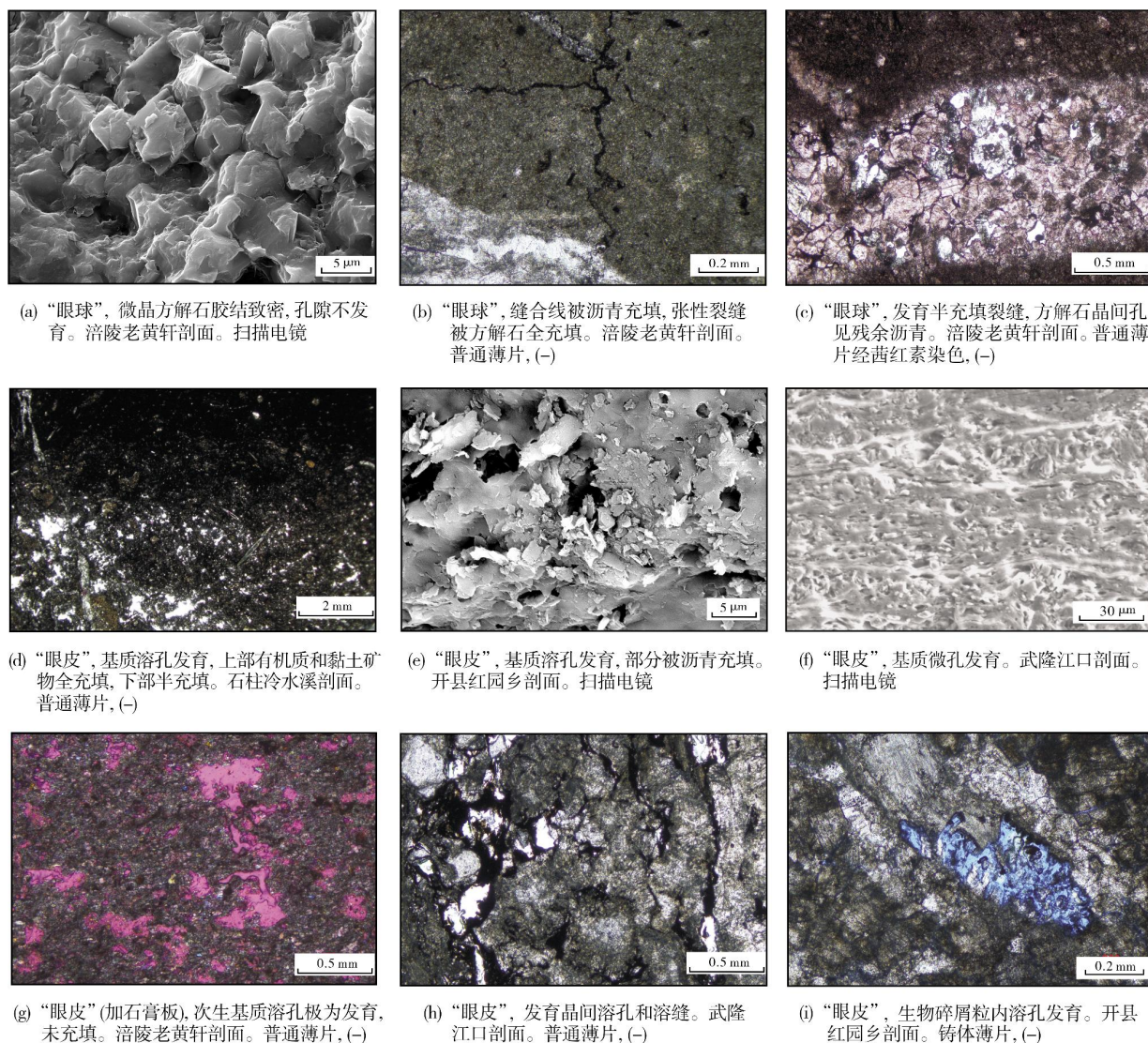


图3 四川盆地东部中二叠统茅口组眼球状石灰岩储集空间类型

Fig. 3 Reservoir space types of eyeball limestone in the Middle Permian Maokou Formation in East Sichuan Basin

2.3 储层物性特征

对研究区茅口组4条野外实测剖面(位置见图1a)的34个眼球状石灰岩的小直径取心样品(由于“眼皮”岩性较疏松,本次的物性样品均是用钻机在野外直接钻取),包括17个“眼球”样品和配套的17个“眼皮”样品,进行了基质孔隙常规物性分析化验。

分析结果(图4)表明:茅口组眼球状石灰岩“眼球”和“眼皮”的物性总体较差,且“眼皮”的储集能力和渗透能力均优于“眼球”。在储集能力方面(图4a),“眼球”孔隙度极低,为0.05%~1.59%,均值为0.30%,

其中孔隙度小于0.2%的样品占总数的58.8%;相比之下,“眼皮”孔隙度相对较高,为0.19%~7.39%,均值为1.86%,孔隙度主要介于0.2%~2%之间,占样品总数的64.7%,有29.4%的样品孔隙度大于2%。在渗透能力方面(图4b),“眼球”和“眼皮”渗透率均较低,均小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主体均介于 $(0.001 \sim 0.01) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,占各自样品总数的66.7%。“眼球”渗透率平均值为 $0.005 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大值为 $0.052 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;“眼皮”渗透率平均值为 $0.013 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大值为 $0.093 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。相对高渗透率段($(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)中,“眼球”样品占比(6.7%)远远低于“眼皮”样品(26.7%)。

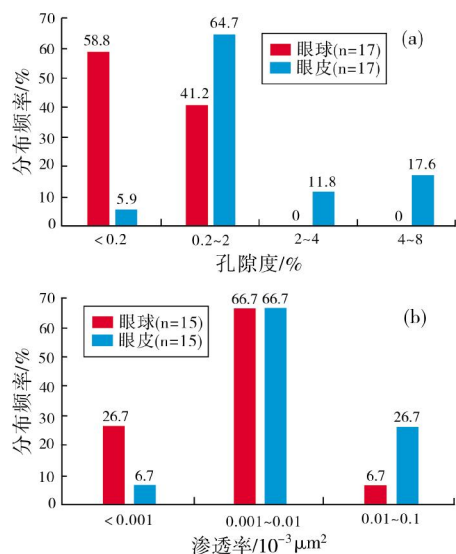


图4 四川盆地东部中二叠统茅口组眼球状石灰岩小直径岩心物性频率分布直方图

Fig. 4 Percentage histogram of physical property of small diameter core of eyeball limestone of the Middle Permian Maokou Formation in East Sichuan Basin

将研究区茅口组眼球状石灰岩的30个孔渗配套的小直径取心样品分为“眼球”(n=15)和“眼皮”(n=15)2类,并绘制孔隙度—渗透率相关关系图(图5)。从图5可以看出,眼球状石灰岩的“眼球”和“眼皮”分别表现为特低孔特低渗和低孔低渗的特征。具体而言,“眼球”孔渗相关性较差,表现为渗透率受孔隙度影响不大,具有裂缝渗流的特征,这与其主要发育缝合线和张裂缝的特征一致(图3b,3c);“眼皮”孔渗相关性较好,表现为渗透率随孔隙度的增加而增加的孔隙型储层特征,这与其主要发育基质溶孔、晶间溶孔、溶缝等各类次生溶蚀孔隙的特征一致(图3d—3i)。

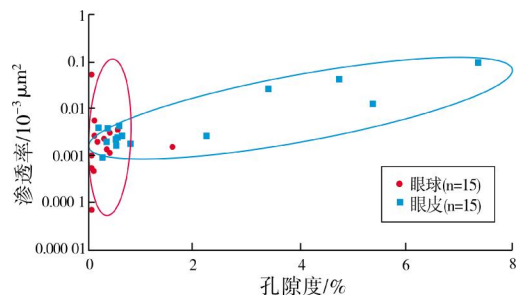


图5 四川盆地东部中二叠统茅口组眼球状石灰岩孔隙度—渗透率相关关系图

Fig. 5 Correlation between porosity and permeability of eyeball limestone of the Middle Permian Maokou Formation in East Sichuan Basin

前人的研究表明:眼球状石灰岩遍及华南地区中二叠统^[14,17],其中的“眼皮”富含有机质,可作为中国南方区域性烃源岩^[18-19]。这也在近期勘探实践中得到了证实,如ST1井、NC1井(井位见图1a)中二叠统灰质烃源岩的平均有机碳含量分别达5.67%和3.68%^[32]。结合上述储层特征分析,认为这一特殊岩类可作为茅口组又一类致密灰岩型储集体,而且其分布较广,富含有机质,勘探潜力不容忽视。

3 眼球状石灰岩储层成因

3.1 岩石成因

眼球状石灰岩属灰岩—泥灰岩韵律层的范畴^[33-34],当然灰岩—泥灰岩韵律层也只是作为一个野外描述性的术语,其在碳酸钙含量方面没有实际意义^[35];因其形状似眼球,石油行业习惯于将其称为眼球状石灰岩^[17]。它们通常被视为沉积环境频繁变化的记录者^[36-37]。关于茅口组眼球状石灰岩的成因,国内主要有以下2类观点:陆源碎屑的稀释旋回成因^[14]和上升流旋回成因^[18]。成岩作用对其有重要的影响,然而,关于灰岩—泥灰岩韵律层为沉积成因的观点一直被怀疑,因为灰岩易受成岩作用改造^[38-40]。例如,关于华南中二叠统栖霞组眼球状石灰岩的成因,国内就有学者认为是成岩作用^[15,34]。产生争议的主要原因是“眼球”和“眼皮”经历了截然不同的沉积后作用^[41],即所谓的差异成岩作用^[42]。具体来说,“眼球”在早期成岩作用阶段已经被碳酸钙胶结,并在很大程度上未压实而使其保存状态较好^[43];相比之下,“眼皮”中的碳酸钙在受到溶解时,同时被增加的沉积物负荷压实^[44]。差异成岩作用是由于有机质在微生物活动或作用下腐烂而使孔隙水化学性质发生变化引起的^[45];“眼皮”中的不稳定碳酸盐矿物文石因为孔隙水化学梯度的改变而被溶蚀,产生的钙离子运移到“眼球”中,形成微亮晶胶结物(图6)^[46-47],而且这一过程发生在早期成岩阶段的海水埋藏成岩环境^[34]。

3.2 储层成因

基于眼球状石灰岩宏观、微观特征,结合前人研究成果,笔者初步认为川东地区茅口组眼球状石灰岩储层的形成与该类岩石的成岩过程密切相关。前已述及,眼球状石灰岩中发育大量粗枝藻类(图2c,2e,2i),

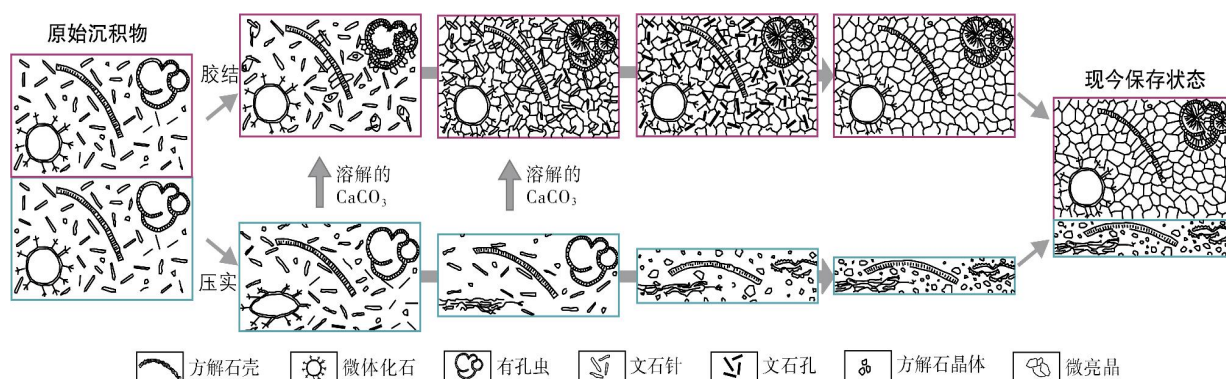


图 6 灰岩—泥灰岩韵律的差异成岩作用 (据文献[47]修改)

Fig. 6 Differential diagenesis of limestone marlstone rhythm (cited from literature [47], modified)

说明其沉积环境应在透光带以内^[48]。现代粗枝藻类主要生活在浅水海洋环境中,通常在5~6 m水深、较高水温的水域最繁盛,在10~30 m水深开始变得稀少,最深可至90 m水深^[49]。此外,在眼球状石灰岩中见到大量腕足化石,其个体保存完整、种类丰富,发育壳刺,壳饰相对较强(图2d)。而浅水碳酸盐台地环境中食物和氧气相对丰富,腕足类分异度较高、个体较大、壳饰较强,而且在水体相对较浅的环境中,水动力较强,腕足类为了稳定壳体,壳刺大量发育^[50]。结合研究区的区域地质背景,认为茅口组眼球状石灰岩沉积期应为一个浅水—极浅水的开阔碳酸盐台地沉积环境。

石炭纪—二叠纪冰室气候时期的大陆冰盖是在一系列不连续的冰期形成的,二叠纪冈瓦纳大陆冰盖的推进和消融在低纬度地区形成了许多高频海平面升降变化^[51]。川东地区茅口组眼球状石灰岩沉积期,对应于中二叠世茅口早期可上超至台地内部的

高频低幅的海平面震荡式上升时期,受海平面周期性升降变化影响,眼球状石灰岩频繁暴露地表,并遭受大气淡水淋溶作用。基于早期海水埋藏成岩作用阶段形成的层状组构差异(图7a),“眼皮”由于文石的溶解而疏松多孔,“眼球”由于碳酸钙的沉淀而胶结致密(图7b),“眼皮”的孔渗性能优于“眼球”,这使得“眼皮”岩溶作用发育强烈,不溶泥质含量相对富集,发育各类次生溶蚀孔隙(图3d, 3g, 3i),但仍可见些许溶蚀残余(图2g)。“眼皮”中高效的岩溶系统输导体系有利于后期油气的充注,使得沥青含量相对富集,并产生相应的埋藏期有机酸溶蚀孔隙(图3h)。最后在深埋过程中,受差异压实作用影响,“眼皮”中生物碎屑定向性、有机质流动状构造进一步加强,“眼球”因差异压实作用的逐渐增强而依次呈现出顺层连续串珠状、顺层断续串珠状和杂乱状(图2a, 2b),并于“眼球”和“眼皮”中产生压溶缝(图3b),从而形成该类眼球状石灰岩储层(图7c)。

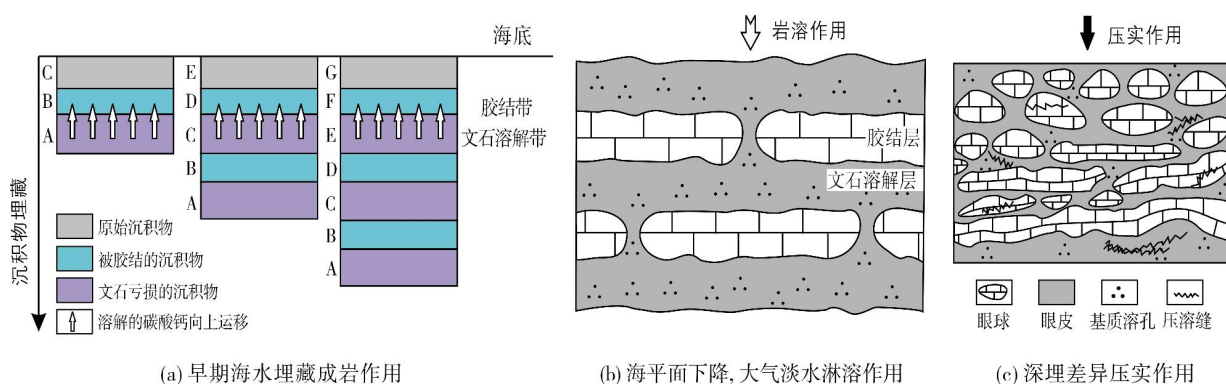


图7 四川盆地东部中二叠茅口组眼球状石灰岩储层成因示意图 ((a) 据文献[46]修改; (b) (c) 据文献[17]修改)

Fig. 7 Genetic map of eyeball limestone reservoir in Maokou Formation of Middle Permian in East Sichuan Basin

((a) cited from literature [46], modified; (b), (c) cited from literature [17], modified)

4 结 论

(1)四川盆地东部中二叠统茅口组眼球状石灰岩由“眼球”与“眼皮”两部分组成,二者宏观、微观特征具有较大差异;“眼皮”部分孔渗性能相对较好,储集空间主要为各类次生溶蚀孔隙,孔渗相关性好,为低孔-低渗的孔隙型储层,可作为茅口组致密灰岩储层。

(2)眼球状石灰岩储层的形成与该类岩石的成岩过程密切相关:早期海水埋藏成岩作用阶段形成的层状组构差异为后期成岩流体的叠合改造奠定了物质基础;准同生期暴露期间,大气淡水选择性作用于孔渗性较优的“眼皮”组构,进一步促成了眼球状石灰岩储层物性的分异。沉积后的岩溶作用是该类储层形成的关键。

参 考 文 献

- [1] 陈宗清. 四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(5): 1-11.
- [2] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 347-354.
- [3] 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 四川盆地栖霞组—茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. 天然气工业, 2016, 36(4): 8-15.
- [4] 胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 等. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 45-55.
- [5] 肖笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组二段沉积微相研究[J]. 沉积学报, 2015, 33(6): 1182-1191.
- [6] 陆正元. 四川盆地中二叠统高自然伽马溶洞储层[J]. 石油学报, 1999, 20(5): 24-26.
- [7] 肖笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组古岩溶地貌恢复及其石油地质意义[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1992-2002.
- [8] 唐雪松, 谭秀成, 刘宏, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组白云岩及云质硅岩储层特征与发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 731-743.
- [9] 刘宏, 马腾, 谭秀成, 等. 表生岩溶系统中浅埋藏构造-热液白云岩成因: 以四川盆地中部中二叠统茅口组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 916-927.
- [10] 周进高, 郝毅, 邓红婴, 等. 四川盆地中西部栖霞组—茅口组孔洞型白云岩储层成因与分布[J]. 海相油气地质, 2019, 24(2): 1-12.
- [11] 张坤贞, 王类舒, 杨永灵, 等. 川东北普光地区茅口组白云岩发育特征[J]. 海相油气地质, 2019, 24(1): 20-26.
- [12] 朱洪发, 王恕一. 苏南、皖南三叠纪瘤状灰岩、蠕虫状灰岩的成因[J]. 石油实验地质, 1992, 14(4): 454-462.
- [13] 蓝光志, 张廷山, 高卫东. 川西北地区早志留世瘤状灰岩的类型、成因及意义[J]. 西南石油学院学报, 1994, 16(3): 1-6.
- [14] 薛武强, 刘喜停, 颜佳新, 等. 重庆南川地区中二叠统茅口组眼球状石灰岩成因[J]. 地质科学, 2015, 50(3): 1001-1013.
- [15] 苏成鹏, 谭秀成, 马腾, 等. 川东地区茅口组眼球状石灰岩成因机制及对油气勘探的启示[C]//第十四届全国古地理学及沉积学学术会议论文摘要集, 2016: 49.
- [16] 苏成鹏. 川东地区茅口组眼球状石灰岩成因机制及地质意义[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [17] 罗进雄, 何幼斌, 何明薇, 等. 华南中二叠统眼球状石灰岩特征及成因的思考[J]. 古地理学报, 2019, 21(4): 613-626.
- [18] 罗进雄, 何幼斌. 中上扬子地区二叠系烃源岩特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1416-1425.
- [19] 黄士鹏, 江青春, 汪泽成, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组与茅口组烃源岩的差异性[J]. 天然气工业, 2016, 36(12): 26-34.
- [20] 张廷山, 陈晓慧, 刘治成, 等. 峨眉地幔柱构造对四川盆地栖霞期沉积格局的影响[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1251-1264.
- [21] 许国明, 谢刚平, 隆轲, 等. 四川盆地西南部中二叠统沉积特征与勘探目标[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 27-33.
- [22] 江青春, 胡素云, 江泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳溶蚀地貌及勘探选区[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 949-960.
- [23] 苏成鹏, 唐浩, 黎虹玮, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组顶部钙结壳的发现及其发育模式[J]. 古地理学报, 2015, 17(2): 229-240.
- [24] 罗鹏, 李国蓉, 施泽进, 等. 川东南地区茅口组层序地层及沉积相浅析[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(2): 74-78, 139.
- [25] 苏旺, 江青春, 陈志勇, 等. 四川盆地中二叠统茅口组层序地层特征及其对源储的控制作用[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 34-43.
- [26] 郭旭升, 李宇平, 魏全超. 川东南地区茅口组古岩溶发育特征及勘探领域[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(6): 1-8.
- [27] 张渝昌, 秦德瑜, 丁道桂, 等. 扬子地区古生代盆地构造格架和油气关系的若干初步认识[J]. 石油实验地质, 1989, 11(3): 205-218.
- [28] 陈维涛, 周瑶琪, 马永生, 等. 关于龙门山地区东吴运动的存在及其性质的认识[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1518-1525.
- [29] 肖笛, 谭秀成, 郝爱华, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组碳酸盐岩岩溶特征: 古大陆环境下层控型早成岩期岩溶实例[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 457-476.
- [30] 谭秀成, 肖笛, 陈景山, 等. 早成岩期喀斯特化研究新进展及意义[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 441-456.
- [31] XIAO Di, TAN Xiucheng, XI Aihua, et al. An inland facies-controlled eogenetic karst of the carbonate reservoir in the Middle Permian Maokou Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Marine and petroleum geology, 2016, 72: 218-233.
- [32] 杨光, 汪华, 沈浩, 等. 四川盆地中二叠统储层特征与勘探方向[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 10-16.
- [33] WESTPHAL H, MUNNECKE A, BRANDANO M. Effects of diagenesis on the astrochronological approach of defining stratigraphic boundaries in calcareous rhythmites: the Tortonian GSSP[J]. Lethaia, 2008, 41(4): 461-476.
- [34] 刘喜停, 颜佳新, 马志鑫, 等. 华南栖霞组灰岩—泥灰岩韵律层的成因[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(2): 155-164.
- [35] AMBERG C E A, COLLART T, SALENBIEN W, et al. The nature of Ordovician limestone-marl alternations in the Oslo -

- Asker District (Norway): witnesses of primary glacio-eustasy or diagenetic rhythms? [J]. Scientific reports, 2016, 6: 1-13.
- [36] ELRICK M, HINNOV L A. Millennial-scale paleoclimate cycles recorded in widespread Palaeozoic deeper water rhythmites of North America [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2007, 243(3/4): 348-372.
- [37] HUSSON D, THIBAUT N, GALBRUN B, et al. Lower Mastrichtian cyclostratigraphy of the Bidart section (Basque Country, SW France): a remarkable record of precessional forcing [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2014, 395: 176-197.
- [38] LI Jie, CAI Zhongxian, CHEN Haoru, et al. Influence of differential diagenesis on primary depositional signals in limestone-marl alternations: an example from Middle Permian marine successions, South China [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2018, 495: 139-151.
- [39] MUNNECKE A, WESTPHAL H, KLBL-EBERT M. Diagenesis of plattenkalk: examples from the Solnhofen area (Upper Jurassic, southern Germany) [J]. Sedimentology, 2008, 55(6): 1931-1946.
- [40] SU Chengpeng, LI Fei, TAN Xiucheng, et al. Recognition of diagenetic contribution to the formation of limestone-marl alternations: a case study from Permian of South China [J]. Marine and petroleum geology, 2020, 111: 765-785.
- [41] RICKEN W. Diagenetic bedding: a model for marl-limestone alternations [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [42] REINHARDT E G, CAVAZZA W, PATTERSON R T, et al. Differential diagenesis of sedimentary components and the implication for strontium isotope analysis of carbonate rocks [J]. Chemical geology, 2000, 164 (3/4): 331-343.
- [43] MUNNECKE A, SAMTLEBEN C. The formation of micritic limestones and the development of limestone-marl alternations in the Silurian of Gotland, Sweden [J]. Facies, 1996, 34 (1): 159-176.
- [44] WESTPHAL H, HEAD M J, MUNNECKE A. Differential diagenesis of rhythmic limestone alternations supported by palynological evidence [J]. Journal of sedimentary research, 2000, 70 (3): 715-725.
- [45] RAISWELL R. Chemical model for the origin of minor limestone-shale cycles by anaerobic methane oxidation [J]. Geology, 1988, 16 (7): 641-644.
- [46] BÖHM F, WESTPHAL H, BORNHOLDT S. Required but disguised: environmental signals in limestone-marl alternations [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2003, 189(3/4): 161-178.
- [47] WESTPHAL H. Limestone-marl alternations as environmental archives and the role of early diagenesis: a critical review [J]. International journal of earth sciences, 2006, 95 (6): 947-961.
- [48] 张孝林, 周铁明. 广西隆林地区二叠纪生物礁微体化石与沉积环境研究 [J]. 石油实验地质, 1994, 16(1): 60-69.
- [49] PARVIZI T, RASHIDI K, VACHARD D. Middle Permian calcareous algae and microporphyroclasts (Dalan Formation, Dena Mountain, High Zagros, SW Iran) [J]. Facies, 2013, 59 (1): 149-177.
- [50] 张阳, 何卫红. 华南二叠纪腕足类长身贝类的形态演化规律 [J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2008, 38(12): 1521-1532.
- [51] 严雅娟, 颜佳新, 武思琴. 黔南地区早二叠世大幅度冰川性海平面下降的沉积学新证据 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(2): 372-380.

编辑:董庸

Characteristics of eyeball-shaped limestone reservoir and its genesis of the Middle Permian Maokou Formation in East Sichuan Basin

SU Chengpeng, TAN Xiucheng, WANG Xiaofang, LI Fei,
LU Feifan, LI Minglong, HU Sheng

Abstract: The diagenesis of the eyeball-shaped limestone traditionally interpreted as source rock has been discussed controversially. Based on field outcrops observation, thin sections identification and physical property analysis, the petrology and reservoir property of the eyeball-shaped limestone of the Middle Permian Maokou Formation are studied in East Sichuan Basin, South China, and the formation mechanism is also discussed. The macro- and micro-scopic characteristics of "eyeball" and "eyelid" are quite different. The porosity and permeability of "eyelid" are relatively good. The reservoir space of "eyelid" is mainly composed of various secondary dissolution pores. In particular, positive correlation between porosity and permeability is found within the "eyelid", as such, this type of composition may incorporate into a conventional porous reservoir with low-porosity and low-permeability. In general, this eyeball-shaped limestone, extensively found in the whole Sichuan Basin, can be served as a relatively tight limestone reservoir for future hydrocarbon exploration. Combined the macro- and micro-features of eyeball-shaped limestone with previous research results, this study suggests that the formation of eyeball-shaped limestone reservoir is closely related to its diagenetic process. The stratified fabric differences formed in the early diagenesis stage lay a material foundation for the later exposed karstification. Moreover, the karstification after deposition is the key to the formation of reservoir.

Key words: eyeball-shaped limestone; tight limestone reservoir; diagenetic process; karstification; Maokou Formation; Middle Permian; Sichuan Basin

SU Chengpeng, First author: PhD in progress, major in sedimentary and reservoir geology. Add: No. 8 Xindu Avenue, School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China
TAN Xiucheng, Corresponding author: Professor, Doctoral Supervisor, major in sedimentary and reservoir geology. Add: No. 8 Xindu Avenue, School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China