doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.016

# 宜昌及周边地区寒武系石龙洞组储层特征及勘探方向

刘 安<sup>1,2</sup>,程青松<sup>3\*</sup>,姚明君<sup>4</sup>,李旭兵<sup>1</sup>,刘皓天<sup>4</sup>,李 海<sup>1,5</sup>,危 凯<sup>1</sup> LIU An<sup>1,2</sup>, CHENG Qing-Song<sup>3\*</sup>, YAO Ming-Jun<sup>4</sup>, LI Xu-Bing<sup>1</sup>, LIU Hao-Tian<sup>4</sup>, LI Hai<sup>1,5</sup>, WEI Kai<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉 430205;2. 中国地质调查局南方复杂构造区 页岩油气成藏理论与工程技术创新中心,湖北武汉 430205;3. 中国石油浙江油田公司,浙江杭州 310023;4. 中石化江汉

油田勘探开发研究院,湖北 武汉 430223;5. 中国地质调查局南方复杂构造区页岩气研究中心,湖北 武汉 430205

Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;
Technology Innovation Center for Shale Oil and Gas Accumulation Theory and Engineering in Southern Complex Structural Area,

China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Zhejiang Oilfield Company, Petro China, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 4. Exploration and Development Research Institute of SINOPEC Jianghan Oilfield, Wuhan 430223, Hubei, China;

5. Shale Gas Research Center for Southern Complex Structural Area, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China

**摘要:** 宜昌地区寒武系页岩气的勘探发现表明该区域可能蕴藏巨大的油气资源潜力,寒武系石龙洞组上覆覃家庙组膏岩盖层使 其成为常规油气勘探的重要层位。本文通过宜昌及周边的钻井岩心、薄片观察描述,物性、碳氧同位素等测试,对石龙洞组储层 及控制因素做了研究。结果表明宜昌及周边地区石龙洞组储层主要形成于局限台地环境,储层岩性以细晶云岩、砂屑白云岩为 主, 孔隙度平均值为 5.2%, 渗透率平均值为 8.638×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>, 孔隙类型以晶间溶孔和晶间孔为主。石龙洞组形成于温暖或炎热的 亚热带环境, 控制储层发育的主要因素有沉积相、白云岩化、溶蚀作用和构造裂缝。震旦纪-寒武纪之交古隆起控制了石龙洞组 优质储层分布, 同时也是油气运移的指向区。古隆起边缘烃源岩生烃时间晚, 油气扩散时间短、保存条件相对有利。因此叠合 石龙洞组储层、覃家庙组盖层、圈闭、构造保存条件等因素, 宜昌地区围绕石龙洞组天然气勘探的有利区位于黄陵隆起东南缘-当阳复向斜一带。

关键词: 宜昌地区; 寒武系; 石龙洞组; 储层特征; 控制因素; 天然气勘探方向中图分类号: P536; P539.4文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0436-15

# Liu A, Cheng Q S, Yao M J, Li X B, Liu H T, Li H and Wei K. 2025. Characteristics and Exploration Direction of the Cambrian Shilongdong Formation Reservoir in Yichang and Surrounding Areas. *South China Geology*, 41(2): 436–450.

**Abstract:** The exploration and discovery of Cambrian shale gas in the Yichang area indicates enormous potential for oil and gas resources. The Cambrian Shilongdong Formation, overlaid with the Qinjiamiao Formation gypsum rock cap, has become an important layer for conventional oil and gas exploration. This study has researched the reservoir and controlling factors of the Shilongdong Formation through observations and descriptions of drilling cores from Yichang and its surrounding areas, combined with the information on rock thin sections, physical properties, carbon and oxygen isotopes. The results indicate that the Shilongdong

收稿日期: 2024-12-17;修回日期: 2025-01-01

基金项目:中国地质调局项目(DD20179615、DD20240047)和中国石油浙江油田公司科研项目(2023YQXNCS001-10)

第一作者:刘安(1981—),男,正高级工程师,主要从事油气地质调查与研究研究工作,E-mail:globstar@163.com

通讯作者: 程青松(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事油气勘探和油气地球化学研究工作, E-mail: qingsongyk@qq.com

Formation reservoir in Yichang and surrounding areas was mainly formed in a confined platform environment. The reservoir lithology is dominantly fine crystalline dolomite and granular dolomite, with an average porosity of 5.2% and an average permeability of  $8.638 \times 10^{-3} \mu m^2$ . The pore type is mainly dissolution pores. The Shilongdong Formation was formed in a warm or hot subtropical environment, and the main factors controlling reservoir development include sedimentary facies, dolomitization, dissolution, and structural fractures. The ancient uplift at the turn of the Cambrian and Cambrian periods controlled the distribution of high-quality reservoirs in the Shilongdong Formation and also served as a directional zone for oil and gas migration. The hydrocarbon generation time of the ancient uplift edge source rocks is late, the oil and gas diffusion time is short, and the preservation conditions are relatively favorable. Therefore, the favorable area for natural gas exploration of the Shilongdong Formation in the Yichang area is located in the southeast edge of the Huangling Uplift- Dangyang Syncline, due to factors such as the reservoir of the Shilongdong Formation, traps, and structural preservation conditions.

**Key words:** Yichang area; Cambrian; Shilongdong Formation; reservoir characteristics; control factors; natural gas exploration directions

上扬子地区围绕川中古隆起,在安岳获得了 龙王庙组天然气的重大突破,表明寒武系常规油 气勘探的巨大潜力(杜金虎等,2014;李熙喆等, 2017)。中扬子地区海相生储盖组合与上扬子类 似,但勘探历经数十年没有大的突破,直到2015 年在黄陵隆起东南缘宜昌地区实施的宜地2井才 实现了中扬子地区寒武系页岩气的重大发现,宜 地2井还在天河板组-石牌组钻遇裂缝型气显,气 液分离也成功实现了点火(曾雄伟等,2016;刘安 等,2020),并且宜地2井与上扬子龙王庙组同期 的石龙洞组白云岩储层发育,且上覆覃家庙组膏 盐盖层(刘安等,2020)。因此,宜昌及周边地区石 龙洞组具有进一步勘探研究的价值。

前人研究认为鄂西渝东地区石龙洞组主要形 成于开阔台地和局限台地相沉积(盛贤才等, 2015),颗粒滩是石龙洞组优质储层形成的物质基 础(冯菊芳等,2016),岩石薄片观测揭示鄂西渝东 石龙洞组浅埋藏白云岩化及深埋藏溶蚀作用是储 层成岩的关键作用(韩波等,2018),也有学者认为 凯兴运动在石龙洞组顶部形成的表生岩溶储层是 石龙洞组重要的勘探方向(何幼斌等,2023)。但 是相关研究主要在鄂西渝东地区,宜昌地区石龙 洞组储层基本特征和控制因素有待进一步研究。 本文以石龙洞组钻井岩心描述和测试分析为基 础,研究石龙洞组沉积环境、储层的孔隙结构、孔 隙类型、储层分布特征及控制因素,结合天然气成 藏条件、保存条件分析宜昌及周边地区天然气的 勘探前景。

# 1 地质概况

研究区位于中扬子中部,主体为黄陵古隆起, 包含周边的当阳复向斜、宜都鹤峰复背斜的北 部、神农架复背斜和秭归复向斜的东部(图1)。 宜昌地区寒武系自下而上发育黔东统牛蹄塘组、 石牌组、天河板组,武陵统覃家庙组、武陵统-芙 蓉统娄山关组。震旦纪-寒武纪之交中上扬子地 台伸展裂陷广泛发育,形成隆坳并存的构造格 局。宜昌地区形成神农架-黄陵隆起,以西、以南 地区则形成恩施-巴东裂陷(李智武等, 2019),同 时受到震旦纪晚期惠亭运动影响,湖北中部上升, 形成鄂中古陆,宜昌以东在钟祥-京山一带缺失寒 武系水井沱组和石牌组;鄂中古隆起的存在时间 一直持续到武陵统(郭战峰等,2009),因此震旦 纪-寒武纪之交神农架-黄陵-京山古隆起成片展 布。中扬子地区经历了寒武系岩家河组、牛蹄塘 组、石牌组、天河板组碎屑岩夹碳酸盐岩填平补 齐后, 地势逐渐平坦, 随着海平面持续下降, 发育



图 1 研究区位置图及构造单元划分 Fig. 1 Location map and structural subdivision of the research area

碳酸盐岩台地沉积。宜昌地区典型的石龙洞组一 般为一套浅灰-深灰色中厚层状白云岩、块状白 云岩夹泥粒灰岩,以厚层状白云岩的出现与消失 作为底、顶界划分标志,与下伏天河板组泥质条带 灰岩、上覆覃家庙组薄层状泥质白云岩呈整合 接触。

# 2 沉积特征

#### 2.1 沉积相

石龙洞组在宜昌黄陵背斜南缘主要为内碎屑 白云岩、鲕、豆粒白云岩、砾屑白云岩;长阳、五 峰等地主要为浅灰色中厚层含砾屑颗粒灰岩-斜 层理白云质粒泥灰岩-细晶白云岩,局部夹藕节 状灰岩;北部神农架、保康、南漳—大洪山地区以 浅灰色厚层白云岩为主,顶部白云岩中发育鸟眼、 膏岩假晶等沉积构造。经过了填平补齐中寒武世 晚期宜昌地区逐渐由镶边碳酸盐岩台地转变为缓 坡型格局,石龙洞组为寒武系的第三个三级层序 (谢环羽等,2021)。

通过对露头和岩心岩石学分析,再结合测录 井资料的综合分析(图 2),以 Wilson 碳酸盐岩相 模式(Wilson, 1975)为依据进行沉积相类型的划 分,研究区石龙洞组主要属于局限台地和开阔台 地两类型沉积体系。宜昌地区沉积相特征与震旦 纪-寒武纪之交恩施-巴东裂陷西侧的石柱-彭水地 区类似(何幼斌等, 2023)。

1)局限台地相

局限台地相主要以宜地5井、宜页3井等为 代表,位于碳酸盐岩台地向陆一侧,多发育在潮间 带,水体变浅且循环受限,水体能量总体不高,生 物化石稀少,沉积物主要为泥晶白云岩、粉晶钙质 白云岩、含钙质白云岩,含泥质白云岩,钻井岩心 少见明显的灰岩层。根据岩石组合、沉积构造 及古地貌差异进一步划分出台内滩、云坪、潟湖 亚相。

台内滩亚相:发育在局限台地地势较高的地带,具有水体浅、水动力较强的特点,以发育多种颗粒岩为特征,滩体的单层厚度多大于10m。以 宜地5井为例,台内滩岩石类型主要为砂屑白云 岩,单层厚度普遍大于 10 m,另见鲕粒白云岩、核 形石白云岩(图 3a),单层厚度一般小于 10 m。发 育交错层理、冲刷面、鸟眼孔(图 3b)等沉积构造。

云坪亚相:位于局限台地内潮间带的地势较 高处,水体较浅,水位变化频繁,常出露于海面。 沉积物主要是灰白色-深灰色粉晶含灰白云岩、 泥晶白云岩(图 3c)、藻纹层云岩,偶见水平层理。

潟湖亚相:位于局限台地内的低洼地带,潟湖 与广海的循环受限,水体处于停滞状态。潟湖沉 积以静水沉积为主,岩石类型以灰色、深灰色泥— 粉晶白云岩、泥质白云岩、含泥质条带泥晶白云 岩、膏质白云岩为主,荆门三个寨子剖面为典型的



Fig. 2 Sedimentary connected well profile of Shilongdong Formation in the Yichang area



图 3 宜昌地区石龙洞组沉积特征

#### Fig. 3 Sedimentary characteristics of Shilongdong Formation in the Yichang area

a.核形石白云岩; b.鸟眼构造; c.泥晶白云岩,发育纹层; d.砾屑白云岩; e、f.核形石白云岩,亮晶胶结; g.砂屑云岩,发育溶蚀孔; h.泥质条带灰岩; i.深灰色云质灰岩,发育水平层理

潟湖相沉积,见大量的膏岩假晶,神农架地区也发 育类似沉积。

2) 开阔台地相

开阔台地相以宜地2井、阳页1井、长阳文 家坪剖面等为代表,位于研究区西南部,开阔台地 相与局限台地相向海一侧相邻,水体环境较局限 台地相而言相对流通,盐度正常。岩石类型主要 为灰色、深灰色中厚层泥晶-粉晶灰岩、薄-中层状生屑灰岩、鲕粒灰岩,见泥质条带结构,夹 白云岩或与之互层。

浅滩亚相:发育于开阔台地内部,水体能量较高,有利于颗粒的沉积。沉积物主要为砂屑灰岩、 鲕粒灰岩、砾屑白云岩(图 3d)、核形石白云岩 (图 3e、3f),砂屑白云岩(图 3g),见斜层理、交错 层理等。如文家坪剖面整体以砂屑灰岩、鲕粒灰 岩、豆粒灰岩为主,夹砂屑白云岩、粉晶白云岩; 而宜地2井则以白云岩颗粒滩沉积为主,反映出 二者水深的差异。

滩间海亚相:发育于浅滩之间的洼地,水动力

较弱,以静水细粒沉积为主。沉积物主要由灰色、 深灰色泥晶灰岩和粉晶灰岩、含泥质灰岩组成 (图 3h),夹少量云质灰岩(图 3i),露头上偶见三 叶虫化石。如长阳偏岩桥剖面石龙洞组主要是深 灰-灰黑色含泥质、云质灰岩层,阳页1井穿过天 阳坪断层上盘揭示石龙洞组均为灰岩沉积,下盘 石龙洞组夹少量的白云岩、泥质白云岩。

#### 2.2 岩相古地理

在连井相剖面分析的基础上,根据白云岩、灰 岩、膏盐岩的含量进行沉积相类型划分(冯增昭, 2004),以"白云岩含量 50%以上为局限台地,灰岩 含量 50%以上为开阔台地,颗粒碳酸盐岩含量 20%以上为滩体,以含泥云岩、含膏云岩为主则为 潟湖"的划分原则大致将沿兴山—宜昌一线以东、 以北地区划分为分布广泛的局限台地相沉积;岩 性主要为白云岩,极少夹灰岩层。局限台地以云 坪为主,分布面积大,但可能还受到钻井和剖面分 布稀疏的影响,在无其他证据的情况下默认为云 坪。兴山、赵吉坪等局限台地边缘分布白云岩颗 粒滩,局限台地内部也分布颗粒滩,如宜地5井。 局限台地内部向北东向水体进一步变浅,局部洼 地发育潟湖沉积、膏岩沉积,如荆门三个寨子。沿 着兴山—宜昌一线以西、以南地区为开阔台地相 沉积,岩性主要为灰岩夹白云岩或与之互层。开 阔台地相中颗粒滩亚相在宜地2井-偏岩桥一带 发育,厚度整体较大,超过150m;滩间海广泛分 布,岩性以泥晶灰岩、灰质白云岩为主。

钻井和剖面统计可知石龙洞组的厚度变化较 大,最薄处荆门三个寨子厚度仅为14.7 m,最厚处 兴地1井240 m(图4)。整体看在研究区内,由北 东向南西方向石龙洞组由薄变厚再变薄,古水深 具有变深趋势。三个寨子剖面白云岩中发育鸟 眼、晶洞、膏盐假晶等构造,水深浅,地层薄。宜 地5井、宜地2井等剖面颗粒滩相发育,碳酸盐岩 生长速度快。长阳文家坪、文家溪等剖面水体变



图 4 宜昌地区石龙洞组岩相古地理特征

Fig. 4 Paleogeographic characteristics of lithofacies in the Shilongdong Formation of the Yichang area

深,代表高水位域沉积的地层厚度再变薄。

### 3 储层特征

#### 3.1 储层岩石类型

石龙洞组的储层岩性以细晶白云岩、砂屑白 云岩为主,次为粉晶白云岩、鲕粒白云岩,少量为 泥晶白云岩、云云质灰岩、灰质云云岩。

(1)细晶白云岩:白云石含量 80%~100%,平 均为 98.5%;大多数颗粒结构完全消失,普遍见少 量黄铁矿、炭质及陆源泥质等,砂屑和残余颗粒较 少,局部见粗晶(图 5a、5b、5c)。

(2)砂屑白云岩:砂屑含量 10%~83%,平均 值为 41.9%;残余颗粒含量 0%~87%,平均值为 26.8%; 砾屑和极细砂屑较少, 白云石和方解石胶 结(图 5d、5e)。

(3) 鲕粒白云岩:主要为白云石,方解石含量 少于4%, 鲕粒包含正常鲕粒(粒径0.6~0.8 mm), 部分为复鲕和变形鲕, 鲕粒核心见泥晶白云石、方 解石、石英等(图5f)。

(4)粉晶白云岩:粉晶含量平均为 67.6%,中 晶、粗晶、团块和残余颗粒较少(图 5g)。

#### 3.2 孔隙类型

石龙洞组碳酸盐岩原生孔隙不发育,仅见少 量白云石晶间孔,主要以次生的晶间溶孔和晶间 孔为主,其次是粒间溶孔和粒内溶孔,偶见晶内溶 孔、裂缝和非组构溶孔,部分构造裂缝发育。

(1) 晶间孔: 主要是白云石晶粒间的孔隙, 孔



图 5 宜昌地区石龙洞组岩石学及储层特征

Fig. 5 Petrological and reservoir characteristics of Shilongdong Formation in the Yichang area

a.细晶白云岩,晶间孔发育,宜地5井,336.7m,单偏光;b.细晶白云岩,晶间溶孔发育,宜地2井,1130m,单偏光;c.粗晶白云岩,发育晶间 孔洞,宜地5井,336.7m,单偏光;d.砂屑白云岩,粒间孔发育,宜地2井,1118m,单偏光;e.砂屑白云岩,粒间孔发育,宜地2井, 1126.6m,单偏光;f.鲕粒白云岩,粒内溶孔,宜地5井,244.5m,单偏光;g.粉晶白云岩,晶间溶孔发育,宜地4井,514.25m,单偏光; h.泥晶白云岩,多期次裂缝被方解石充填,宜地4井,625.35m,单偏光;i.粉晶白云岩,裂隙被泥炭质充填,宜地5井,259.75m,单偏光. 隙多呈不规则状或三角形,晶粒越粗孔径越大,是 白云岩化过程中对先期孔隙调整形成(图 5a)。

(2)晶间溶孔:晶间溶孔在细晶白云岩、粉晶 白云岩中发育,晶间孔径溶蚀增大,形成晶间溶孔 (图 5b、5g)。

(3)粒内溶孔:是同生-早期成岩阶段颗粒内 部被选择性溶蚀作用形成的孔隙,石龙洞组鲕粒 白云岩中鲕粒发育该类孔隙(图 5f),颗粒全部被 溶蚀,但保留了其外观可辨别,形成铸膜孔。

(4)粒间溶孔:发育于砂屑白云岩和鲕粒白云 岩中,碳酸盐岩颗粒由于受到准同生期大气淡水 的溶蚀形成孔隙,孔隙发育于颗粒之间,呈不规则 多边形(图 5d)。

(5)溶蚀孔洞:孔径大于 2 mm,分布不均匀, 孤立分布或顺层分布,孤立分布的溶孔多被方解 石充填,顺层分布的溶孔则多数未被充填,溶孔在 细晶白云岩中尤为发育。

(6)裂缝:裂缝主要见构造缝和压溶缝,以构 造裂缝为主;各个井构造裂缝发育密度差异大,其 中宜地4井尤为发育。构造缝边缘平直、延伸远, 部分被断续充填,充填物为方解石、石英以及泥质 (图 5h)。部分样品发育压溶缝,宽度 0.005~ 1.11 mm,压溶缝被方解石、白云石或者泥炭质全 充填(图 5i)。

#### 3.3 岩石物性

通过对宜地 2 井、宜地 4 井、宜地 5 井共计 213 个岩心样品统计显示孔隙度为 0.4%~19.8%, 平均值为 5.2%, 渗透率为 0.016×10<sup>-3</sup>~245.511× 10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>, 平均值为 8.638×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>(图 6、7)。孔 隙度值主要集中在小于 2% 和 2%~10% 的区间 内,分别占总样品数的 21.6% 和 66%, 渗透率主要 集中在小于 0.1×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup> 的区间内,占总样品数 的 53.1%,其次是 0.1×10<sup>-3</sup>~1×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup> 区间,占 总样品数的 23.1%(图 6a、6b)。

孔隙度和渗透率变化范围大主要是由于溶孔 和裂缝的影响。溶孔和裂缝发育,其平均孔隙度 为 9.6%,平均渗透率为 47.896×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,溶孔不 发育样品,其平均孔隙度为 4.2%,平均渗透率只 有 0.249×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。从岩性上来看,物性较好的是 砂屑白云岩和细晶白云岩,物性较差的是白云质 灰岩和灰质白云岩,物性同时也受颗粒大小的影 响(图 6c、6d)。



a.孔隙度直方图; b.渗透率直方图; c.不同岩性孔隙度分布图; d.不同岩性渗透率分布图

#### 3.4 孔隙结构特征

石龙洞组样品按毛管压力曲线形态分类,可 分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型毛管压力曲线。Ⅰ型毛管压力 曲线:特征是具特低排驱压力,较低的中值压力, 较高的汞饱和度(65%~90%),喉道宽度为大喉, 曲线上见又低又平的角度段,基本上是样品含有 裂缝、裂纹或溶孔造成的(图 7a)。Ⅱ型毛管压力 曲线:特征是具中等排驱压力,中等的中值压力, 中等汞饱和度(50%~80%),喉道宽度为中-小喉, 少平坦段或低角度段,分选较差(图7b)。Ⅲ型毛 管压力曲线:特征是具高排驱压力,低汞饱和度 (10%~50%),一般未达到中值,喉道宽度为微喉, 曲线形态高陡,分选差(图7c)。



c.Ⅲ型曲线,灰质白云岩,宜地2井,1206.3m

其中, I 型毛管曲线样品溶孔和裂缝发育, 岩 性也以细晶和砂屑白云岩为主, 储层物性较好; Ⅱ型毛管曲线部分样品溶孔发育, 以粉晶和细晶 白云岩为主, Ⅲ型毛管压力曲线样品溶孔均不发 育, 以白云质灰岩和灰质白云岩为主, 物性较差。 就 30 个压汞样品而言, 半数样品为 I 型毛管曲线 样品(图 8)。

4 优质储层形成的控制因素

#### 4.1 沉积相及古环境对储层发育的控制作用

#### 4.1.1 沉积相对储层发育的控制作用

研究区不同岩性的物性揭示了细晶白云岩、 颗粒白云岩较灰质云云岩、白云质灰岩储集条件 好。研究区的岩性明显受沉积相的控制,局限台 地普遍以白云岩为主,极少夹灰岩沉积;开阔台





445

地,特别是滩间海亚相普遍以灰岩沉积为主,白云 岩沉积不发育;因此局限台地较开阔台地储层发 育。颗粒滩属于最有利于储层发育的沉积亚相; 局限台地的颗粒滩和开阔台地靠近局限台地一侧 浅滩发育的地区石龙洞组岩层的厚度普遍较大, 如宜地2井、宜地5井厚度普遍大于100m。颗 粒滩在沉积期所处的地势相对较高,波浪的淘洗 作用充分,沉积物以粗粒结构为主,原生孔隙发 育,可作为孔隙流体的渗流通道,有利于溶蚀、白 云岩化等成岩作用的发生。隆起的核部整体地势 过高、水体浅,荆门市三个寨子、温峡口等剖面石 龙洞组属于潟湖相沉积,不利于储层发育,石龙洞 组厚度一般为10~30m。震旦纪-寒武纪之交形 成的神农架、黄陵和鄂中古隆起在石龙洞组沉积 阶段仍然表现出继承性隆起,控制了沉积相的分 布,从而控制了白云岩储层的分布。

4.1.2 古环境对储层的控制作用

宜地 2 井碳酸盐岩的氧同位素 δ<sup>18</sup>O 均大于 -10‰,表明数据有效(图9)。石龙洞组上部为黔 东统都匀阶顶部, 宜地 2 井具有明显的碳同位素 负异常,为石龙洞组碳同位素最大负偏移(-1.84‰), 但氧同位素没有明显负偏移,且在该井石龙洞组 顶部没有发现古岩溶的迹象,因此该负偏不是古 大气水的影响所致。宜地2井石龙洞组顶部的碳 同位素最大负偏移对应都匀阶顶部的 ROECE 事 件,是一个全球性的碳同位素负异常事件,被认为 与三叶虫的灭绝事件密切相关,可以作为地层对 比的标志(Zhu M Y et al., 2019)。上扬子川中地 区龙王庙组顶部(赵玉茹等, 2024)、中扬子湘西王 村清虚洞组(Zhu M Y et al., 2004)也存在该负异 常,表明龙王庙组、清虚洞组和石龙洞组顶界具有 等时性。石龙洞组碳同位素组成自下而上具有先 减小后增大,至顶部降为最低的特征,龙王庙组整 体特征与之类似。

利用碳酸盐岩的碳氧同位素反映古海洋的温度和盐度在上扬子地区已获得较好的应用(Zhu MY et al., 2004;任影等, 2016)。碳酸盐岩中的氧同位素可以用来估算沉积期海水温度,通常使用Epstein and Mayeda (1953)提出的经验公式:

 $t(^{\circ}C) = 15.976 - 4.2 \times \delta^{18}O + 0.13 \times (\delta^{18}O + 0.22)^{2}$ 





针对中生代以前的碳酸盐岩地层,需要先校 正后计算(邵龙义,1994)。首先用样品的δ<sup>18</sup>O平 均值(-6.59‰)减去第四纪海相石灰岩δ<sup>18</sup>O平均 值(-1.22‰),得差值为5.39‰,再将各样品的 δ<sup>18</sup>O 值减去该差值得到校正数值,然后利用上述 公式计算古温度,由此得出研究区龙王庙组沉积 期古海水温度为11.3~32.7℃(平均值21.4℃)。 整体上,石龙洞组下部温度较上部高,1165 m以 深平均值26.3℃,1165 m以浅平均值为15.5℃, 与川中地区龙王庙组特征相似(赵玉茹等,2024); 可能反映了整个中上扬子地区古温度变化的一致性。

Keith and Weber(1964)提出用 Z 值来指示古 盐度,经验公式为:

 $Z = 2.048 \times (\delta^{13}C + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}O + 50)$ 

由此计算得到石龙洞组样品 Z 值除个别值外 均大于 120,平均值为 124.2。通常认为 Z>120 指 示海相(或陆相湖泊咸水)灰(云)岩(Keith and Weber, 1964)。研究区样品的 Z 值数据反映石龙 洞组为正常海相碳酸盐岩沉积,古盐度略高于 川中地区(Z 值平均为 122.9)。石龙洞组 1167 m、 1242 m 处个别样品的 Z 值略低于 120,可能受到 了古大气淡水的影响(图 9)。 古气温平均值为 21.4 ℃, 说明当时为温暖或 炎热的亚热带气候, 与前人研究揭示的寒武纪扬 子板块位于北纬 30°、东经 105°的结论一致(韩波 等, 2018), 也说明白云岩成岩温度较低, 形成于准 同生期或早期成岩阶段。

#### 4.2 白云岩化对储层发育的控制作用

研究区白云岩化对孔隙形成具有建设性作 用,优质储层对应的岩性均为白云岩,白云岩化不 彻底的白云质灰岩、灰质白云岩孔隙度普遍偏 低。前人研究表明川东地区龙王庙组发生的白云 岩化作用主要包括海水渗透白云岩化、大气淡水 白云岩化和埋藏白云岩化,并以海水渗透白云岩 化作用为主(任影等,2015)。官昌地区石龙洞组 白云石形成主要发生于准同生-浅埋藏时期。细 晶、粉晶白云岩一般含较多晶间孔隙,这些孔隙可 被沥青充填,显示晶粒白云岩的晶间孔隙是储层 孔隙演化中的有效孔隙,白云石晶间雾心亮边 (图 10a),表明其形成于浅埋藏阶段(盛贤才等, 2015)。石龙洞组发育大套残余粒屑白云岩,明显 为白云石在成岩环境中交代颗粒灰岩的产物,其 中砂屑白云岩、鲕粒白云岩以及残余粒屑云岩形 成过程中,白云石交代方解石多以等体积方式进 行,方解石原来所具有的晶体结构控制并影响着 交代白云石的晶体结构,因此交代前后的结构常 常能保持相似的特点,形成具有原有颗粒轮廓 或颗粒痕迹、阴影、幻影等残余结构的白云岩 (图 10b)。由于这几类白云岩常具有粉晶结构, 残留较多晶间孔隙,是石龙洞组现今重要的储集

岩类型,部分此类岩石的晶间孔中有沥青-黄铁矿 充填,显示其可成为油气聚集的有效储集空间。

#### 4.3 溶蚀对储层发育的控制作用

基于岩石薄片镜下观察结果,初步认为宜昌 地区石龙洞组大致有两期埋藏溶蚀作用。第一期 发生在液态烃充注之前,地层因溶蚀作用形成大 量孔隙,形成了储层重要的有效储集空间,经液态 烃充注热解后孔壁上一般可见沥青附着(图 11a)。 第二期发生在液态烃热解之后,属于中-深埋藏成 岩阶段的晚期溶蚀,此次溶蚀作用会形成新的溶 蚀孔隙,孔壁未见沥青附着;也会在原有孔隙的基 础上进一步溶蚀,对原有孔隙起到扩充的作用,从 而使原始孔隙孔壁上附着的沥青清除,使其仅见 于孔壁局部,多数溶蚀孔均可见此类特征(图 11b)。 4.4 构造破裂是局部储层物性改善的重要因素

统计分析显示天阳坪断裂以南地区的宜地 4 井比天阳坪断裂以北的宜地 2 井、宜地 5 井破 碎带和裂缝更发育(图 12)。宜地 4 井破碎带多 达 11 个,累计厚度 57 m;宜地 5 井 1 个破碎带, 厚 22 m。破碎带之外的岩层裂缝密度宜地 4 井 平均为 25.6 条/m,宜地 5 井 为 15.8 条/m,宜地 2 井为 5.5 条/m;宜地 4 井裂缝密度是宜地 2 井 的 5 倍。岩心显示宜地 4 井裂缝黑有多期次的特 点,破碎带部分全充填,部分见有大量的半充填和 未充填的裂缝(图 13a、13b),显微镜下亦可见充 填物为有机质、石英、方解石、黄铁矿,部分未充 填(图 13c、13d、13e),对应岩层具有较高的孔渗 特征;宜地 5 井破碎带以全充填裂缝为主(图 13b);



图 10 石龙洞组白云岩化 Fig. 10 Dolomitization of Shilongdong Formation a.细晶白云岩,雾心亮边; 宜地 5 井, 336.7 m, 单偏光; b.残余砂屑粉晶云岩, 宜地 2 井, 1108 m, 单偏光



图 11 石龙洞白云岩溶蚀作用 Fig. 11 Dissolution of Shilongdong dolomite





Fig. 12 Comparison of physical properties and fracture development characteristics of Shilongdong Formation in different wells

孔隙度和渗透率没有明显增加(图 12)。宜地 2 井、宜地 5 井孔隙度与裂缝发育的密度没有直接 关系。宜地 4 井储层高孔隙度样品往往是破碎带 和裂缝高密度段,岩石薄片揭示了部分样品基质 孔隙度不发育,孔隙主要是裂缝,这与样品压汞揭 示大孔径孔隙发育相吻合。





黄陵隆起东南缘以天阳坪断裂为界,天阳坪 断裂以北地区属于断裂的下盘,因黄陵花岗岩刚 性基底的保护作用,就抬升剥蚀的力学机制而言, 黄陵隆起地区主要受到的是 200 Ma 以来垂向降 升的影响,黄陵隆起降升具有整体性,越靠近核部 降升剥蚀程度越高(Shen C B et al., 2012), 致使沉 积盖层围绕隆起向四周倾斜,盖层的褶皱、断裂不 发育。天阳坪断裂以南地区属于断层的上盘,一 方面受到陆内递进变形的影响(梅廉夫等,2010), 另一方面受到黄陵刚性基底的砥柱作用,构造变 形较周边地区更为强烈且极为复杂。因砥柱作用, 在天阳坪断裂以南地区形成多条与仙女山断裂相 平行的右行走滑断裂,与 NEE 走向的逆冲断层共 同作用将沉积盖层切割成多个菱形块体,导致岩 层裂缝和破碎带发育(刘安等, 2020)。因此天阳 坪断裂以南石龙洞组储层虽然孔隙度也较高,但 属于裂缝主导,且构造过于发育,保存条件变差。

# 5 石龙洞组天然气勘探方向

保存条件是影响中扬子地区油气成藏富集的

关键因素。已有的勘探实践表明,大冶-巴东对冲 干涉带构造保存条件相对较好。在该构造带围绕 黄陵隆起已发现了震旦系、寒武系、志留系多层 系页岩气(刘安等, 2020),并且在该对冲带的当阳 复向斜测得志留系龙马溪组页岩的压力系数为 1.20~1.49, 具有超压属性(邹辰等, 2016), 是构造 保存条件较好的具体体现。对冲干涉带形成了以 寒武系牛蹄塘组页岩为烃源岩,石龙洞组为储层, 覃家庙组为盖层的生储盖组合。覃家庙组膏岩盖 层在中上扬子地区分布广泛,本次调查揭示了黄 陵隆起周缘膏岩盖层较发育,在宜地2井、宜地 3井等多口寒武系钻井均发现了覃家庙组厚度超 过100m的含膏盐地层,向东至远安-当阳一带数 口井也发现了覃家庙组发育大套膏质白云岩盖 层。与泥岩盖层相比较,膏盐盖层的塑性和流动 性强,在强烈构造挤压后仍然具有很高的封闭能 力(金之钧等,2006)。

如前文所述,石龙洞组有利储层分布与震旦 纪-寒武纪之交古隆起分布密切相关。从成藏角 度看,古隆起往往是油气运移的指向区(赵宗举 等,2003);另一方面宜昌地区古隆起周缘震旦系- 志留系沉积厚度相对较薄,导致寒武系牛蹄塘组 页岩的生烃相对滞后,大规模生气在侏罗纪深埋 之后(陈科等,2020)。中扬子北缘晚三叠世至中 侏罗世属于前陆盆地发育阶段(刘少峰等,2010), 在近南北向挤压作用之下,该区域具有形成构造 圈闭的潜力;且石龙洞组颗粒滩属于地貌上的高 点,易形成岩性-构造复合圈闭,因此石龙洞组具 有形成多类型圈闭的可能,且圈闭形成早于寒武 系页岩的生气高峰。

因此,叠合石龙洞组储层、覃家庙组盖层、圈 闭、构造保存条件等因素,围绕石龙洞组天然气勘 探的有利区分布在黄陵隆起东南缘-当阳复向斜 一带。

# 6 结论

(1)宜昌地区石龙洞组储层主要形成于云坪、 颗粒滩沉积亚相,储层岩性以细晶白云岩、砂屑白 云岩为主;孔隙度平均值为 5.2%,渗透率平均值 为 8.638×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;孔隙类型以晶间溶孔和晶间孔 为主,其次是粒间溶孔和粒内溶孔。

(2)沉积相、白云岩化、溶蚀作用和构造裂缝 是控制宜昌地区石龙洞组储层发育的主要因素。 局限台地控制了优质储层的展布,颗粒滩属于最 有利于储层发育的沉积亚相;准同生-浅埋藏时期 白云岩化对孔隙形成具有建设性作用;液态烃充 注前后的两次溶蚀作用形成了储层重要的有效储 集空间;构造作用是天阳坪断裂以南石龙洞组储 层孔隙发育的重要因素。

(3)叠合石龙洞组储层、覃家庙组盖层、圈闭、构造保存条件等因素,围绕石龙洞组天然气勘探的有利区分布在黄陵隆起东南缘-当阳复向斜一带。

#### 参考文献:

- 陈科,翟刚毅,包书景,宋腾,林拓,李浩涵,金春爽,孟凡 洋,唐显春,张焱林.2020.华南黄陵隆起构造演化及其 对页岩气保存的控制作用 [J]. 中国地质,47(1):161-172.
- 杜金虎,邹才能,徐春春,何海清,沈平,杨跃明,李亚林,魏国

齐,汪泽成,杨雨.2014.川中古隆起龙王庙组特大型气 田战略发现与理论技术创新 [J]. 石油勘探与开 发,41(3):268-277.

- 冯菊芳,林娟华,田海芹,沃玉进,朱东亚.2016.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,34(2):121-128.
- 冯增昭.2004.单因素分析多因素综合作图法:定量岩相古 地理重建 [J]. 古地理学报,6(1):3-19.
- 郭战峰,刘新民,盛贤才,马登峰.2009.东秦岭—大别造山带 南侧加里东期古隆起特征及油气地质意义 [J]. 石油 实验地质.31(2):181-185.
- 韩 波,何治亮,任娜娜,田海芹,马 强.2018.四川盆地东缘龙 王庙组碳酸盐岩储层特征及主控因素 [J]. 岩性油气 藏,30(1):75-85.
- 何幼斌,蒋 蕾,顾志翔,罗慈航,张欣茹.2023.重庆石柱-彭水 地区下寒武统石龙洞组沉积特征 [J]. 长江大学学报 (自然科学版),20(11):1-12.
- 金之钧,龙胜祥,周 雁,沃玉进,肖开华,杨志强,殷进 垠.2006.中国南方膏盐岩分布特征 [J]. 石油与天然气 地质,27(5):571-584.
- 李熙喆,郭振华,万玉金,刘晓华,张满郎,谢武仁,苏云河,胡 勇,冯建伟,杨炳秀,马石玉,高树生.2017.安岳气田龙王 庙组气藏地质特征与开发技术政策 [J]. 石油勘探与 开发,44(3):398-406.
- 李智武,冉波,肖斌,宋金民,郑玲,李金玺,王瀚,肖斌,叶胡 豪,蔡其新,刘树根.2019.四川盆地北缘震旦纪—早寒 武世隆-坳格局及其油气勘探意义 [J]. 地学前缘, 26(1):59-85.
- 刘 安,陈孝红,李培军,周 鹏,李 海,蔡全升,罗胜元.2020.宜 昌天阳坪断裂两侧页岩气保存条件对比研究 [J]. 地 质科技通报,39(2):10-19.
- 刘少峰,王平,胡明卿,郜瑭郡,王 凯.2010.中、上扬子北部 盆-山系统演化与动力学机制 [J]. 地学前缘,17(3):14-26.
- 梅廉夫,刘昭茜,汤济广,沈传波,凡元芳.2010.湘鄂西-川东 中生代陆内递进扩展变形:来自裂变径迹和平衡剖面 的证据 [J]. 地球科学,35(2):161-174.
- 任影,钟大康,高崇龙,孙海涛,孟昊,胡小林,姜振昌,王 爱.2015.川东及其周缘地区下寒武统龙王庙组储集层 特征与控制因素[J].古地理学报,17(6):829-840.
- 任 影,钟大康,高崇龙,杨雪琪,李海洋,杨 强,刘云龙,王 玉.2016.四川盆地东部下寒武统龙王庙组碳、氧同位 素组成及古环境意义[J].海相油气地质,21(4):11-20.

- 邵龙义.1994.碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系[J].中国矿业大学学报,23(1):39-45.
- 盛贤才,郭战峰,冯畅,胡晓凤,包汉勇.2015.鄂西渝东地区 下寒武统石龙洞组成岩作用特征 [J]. 特种油气 藏,22(4):4-7.
- 谢环羽,姜在兴,王培玺,谢武仁,杨雨.2021.中—上扬子地 区寒武系层序地层格架 [J]. 石油学报,42(7):865-884.
- 曾雄伟,王传尚,刘安,危凯.2016.湖北宜昌地区中寒武统 天河板组沉积相及其油气意义 [J]. 华南地质与矿 产,32(2):142-148.
- 赵玉茹,高达,胡明毅,郑超,李佳,谢武仁.2024.古气候和海 平面变化对浅水碳酸盐岩高频层序及有利储层的控 制—以川中地区龙王庙组为例 [J]. 中国地质,51(2): 577-591.
- 赵宗举,朱琰,邓红婴,徐云俊.2003.中国南方古隆起对中、 古生界原生油气藏的控制作用 [J]. 石油实验地 质,25(1):1-9.
- 邹辰,周松源,梅珏,邵萌珠,秦颦,余鑫培.2016.湖北当阳复 向斜北部页岩气地质评价与有利区优选 [J]. 海相油 气地质,21(2):22-28.
- Epstein S, Mayeda T K. 1953. Variation of O<sup>18</sup> content of

waters from natural sources[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 4(5): 213-224.

- Keith M H, Weber J N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 28: 1787-1816.
- Shen C B, Mei L F, Peng L, Chen Y Z, Yang Z, Hong G F. 2012. LA-ICPMS U-Pb zircon age constraints on the provenance of Cretaceous sediments in the Yichang area of the Jianghan Basin, central China[J]. Cretacous Research, 34: 172-183.
- Wilson J L. 1975. Carbonate facies in geological history[M]. New York: Springer-Verlag.
- Zhu M Y, Yang A H, Yuan J L, Li G X, Zhang J M, Zhao F C, Ahn S Y, Miao L Y. 2019. Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China[J]. Science China: Earth Sciences, 62: 25-60.
- Zhu M Y, Zhang J M, Li G X, Yang A H. 2004. Evolution of C isotopes in the Cambrian of China: implications for Cambrian subdivision and trilobite mass extinctions-zhu maoyan[J]. Geobios, 37: 287-301.