

鄂尔多斯盆地南部寒武系张夏组 储层特征与主控因素



www.
geojournals.cn/georev

张军涛^{1, 2, 3)}, 李松³⁾, 金晓辉³⁾, 周雁³⁾, 张涛³⁾, 马强³⁾, 杨佳奇³⁾

1) 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室, 北京, 102206;

2) 中国石化深部地质与资源重点实验室, 北京, 102206;

3) 中国石化石油勘探开发研究院, 北京, 102206

内容提要:鄂尔多斯盆地南部寒武纪张夏组沉积期鲕粒滩大面积分布, 但储层控制因素尚不清楚, 目前仅在少量钻井中见到工业气流。笔者等利用新钻井和野外剖面岩相学和地球化学的分析, 解剖张夏组储层的发育特征, 进而揭示张夏组储层主控因素。研究取得以下主要认识: ①张夏组储层岩石主要为(残余)鲕粒—砂屑云岩、细—中晶白云岩, 储集空间有溶蚀孔洞、裂缝及扩大溶孔、粒间孔。②张夏组白云岩厚度在鄂尔多斯盆地南部变化较大, 多呈现出“上多下少, 南多北少”的特征。白云岩多具有较粗、相对自形的晶体, 与海水相近的碳氧和锶同位素值, 与海水相似配分模式, 较高的锶含量; 裂缝内充填白云石有鞍状结构, 略微的 Eu 异常。白云岩化作用主要发生在浅埋藏期, 白云岩化流体主要是海水。③鄂尔多斯盆地南部镇原古隆起周缘张夏组受怀远运动和加里东—海西运动岩溶作用影响较强。而远离镇原古隆起区, 储层主要受怀远运动断裂活动影响。断裂活动一方面产生大量的裂缝, 形成储集空间; 另一方面裂缝还为浓缩海水、热液流体和大气降水改造储层提供通道。

关键词: 鲕粒; 白云岩; 断裂; 张夏组; 寒武系; 鄂尔多斯盆地南部

鄂尔多斯盆地寒武系张夏组厚层鲕粒广泛分布(狄明信等, 1986; 陈启来等, 2013; 周进高等, 2020a, 2020b), 与四川盆地普光气田飞仙关组和安岳气田龙王庙组储层岩石类型相似(马永生等, 2010, 2019), 具备形成规模优质储层的基础。但是, 目前仅在西南部镇原古隆附近的陇 17 井、陇 18 井见到工业气流(张春林等, 2021, 2023; 黄军平等, 2024), 尚未实现大规模的勘探突破。

前人曾做过鄂尔多斯盆地张夏组储层发育特征和形成机制研究(邓昆等, 2010; 刘晓光等, 2012; 郝哲敏, 2017; 张春林等, 2021; 李维岭等, 2021)。储集空间类型有晶间孔、晶间溶孔、粒内溶孔和粒间溶孔、溶洞和裂缝等(邓昆等, 2010; 李维岭等, 2021)。储层质量除了受高能相带控制之外, 也受到了岩溶作用影响(张春林等, 2021; 李维岭等, 2021; 魏国齐等, 2022)。

构造期的断裂活动在碳酸盐岩储层形成演化过程起着重要的作用, 塔里木盆地的顺北—富满大型油气田就属于断控型油气藏, 储层是加里东—海西

期断裂作用破碎形成(马永生等, 2022, 2023), 四川盆地二叠系也发育有断控型储层, 热液沿东吴期断裂发生白云岩作用改造形成储层(马永生等, 2023)。传统观点认为, 在鄂尔多斯盆地构造活动相对较弱, 但最新的研究显示也经历了多期的构造运动, 盆地内马家沟组盐下碳酸盐岩储层也受到断裂活动影响(何发岐等, 2024), 断裂作用形成的裂缝进一步改善了台内丘滩的储集性能(何发岐等, 2022)。而且也报道发现储层受到过断控热液作用影响(吴浩文等, 2024), 但是规模相对较小, 对储层影响不大(马尚伟等, 2023)。

张夏组沉积后先后经历了怀远运动、加里东运动和海西运动多期构造活动, 怀远运动是寒武纪重要的构造事件, 广泛发育于华北全区(李相博等, 2021), 开始于张夏组沉积末期, 结束于马家沟组沉积早期(刘化清, 2021), 其成因可能与秦岭—祁连板块对华北板块俯冲有关(刘化清, 2021)。期间发生了广泛的白云岩化作用及岩溶作用, 并形成了三山子组和冶里—亮甲山组储层(李相博等, 2021),

注: 本文为国家自然科学基金资助项目“微生物—石膏—温度协同形成优质白云岩储层机制研究”(编号: 42072177)的成果。

收稿日期: 2024-02-07; 改回日期: 2024-06-28; 网络首发: 2024-07-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.041

作者简介: 张军涛, 男, 1981年生, 博士, 研究员, 长期从事碳酸盐岩储层相关研究工作; Email: Zhangjt.syky@sinopec.com。

但对张夏组储层目前尚无专门的讨论。

与飞仙关组和龙王庙组相对简单的滩相储层相比,断裂活动等因素可能对张夏组储层发育程度有重要的影响。在鄂尔多斯盆地南部地区(下文简称鄂南地区),笔者等利用新钻井和野外剖面岩相学和地球化学的分析,解剖鄂南地区张夏组储层的发育特征和演化过程,进而揭示鄂南地区张夏组储层发育机制和主控因素,以期为后续油气勘探提供理论指导。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北地台的西部。寒武纪早期辛集期,仅在鄂尔多斯盆地西南部有少量的沉积,其后发生多期海侵,由馒头期碎屑岩沉积,逐渐过渡到毛庄期碳酸盐岩与碎屑岩混积,到徐庄沉积晚期时已经为碳酸盐岩沉积。张夏期,鄂尔多斯盆地海侵达到鼎盛,除了伊盟古隆、镇原古隆、乌审旗古隆和吕梁古隆等少数地区外,整个盆地基本都被海水覆盖(陈启林等, 2013; 周进高等, 2020a; 胡晨林, 2023)。

在寒武纪张夏期,鄂尔多斯盆地属于陆表海沉积模式,地势起伏较小,沉积分异小,颗粒滩遍布全,但也有学者认为台内滩仅在局部高地貌或环陆发育(陈启林等, 2013; 周进高等, 2020a),而在盆地西南部,麟探1井、旬探1井、富探1井一带可能有台地

边缘存在(李相博等, 2021; 魏国齐, 2022)(图1)。

张夏组沉积后,受加里东期 I/II 幕(怀远运动)影响,鄂尔多斯盆地开始缓慢海退(李相博, 2021; 张军涛等, 2023)。三山子组沉积范围已经明显小于张夏组,而且地层大部分已经发生白云岩化作用。至早奥陶世冶里—亮甲山期,鄂尔多斯盆地大部分地区又重新暴露,无沉积记录。

2 地层与岩石特征

2.1 地层厚度

由于沉积分异和怀远运动暴露剥蚀的影响,镇原古隆起周缘张夏组地层厚度变化较大,向南缓慢变厚(图2),其中野外剖面岐山二郎沟和礼泉上韩厚度超过 200 m; 南缘钻井旬探1井、旬宜1井、淳探1井、麟探1井、彬2井厚度在 160 m 左右,而盆地内部富探1井、宜探1等井厚度在 120 m 左右,而处于古隆起的灵1井、宁探1井和长探1井由于受到剥蚀,厚度在 100 m 以内。

鄂尔多斯盆地南部地区由北向南白云岩化程度增加,南缘岐山二郎沟和礼泉上韩张夏组整体为白云岩。张夏组可以大致分为两段,下段白云岩程度较弱,以灰岩为主,上段白云岩程度较高,以白云岩为主(图2)。野外剖面和钻井取芯中,灰岩和白云岩中鲕粒都非常普遍。

2.2 储层岩石特征

张夏组储层发育程度表现出了更大的非均质

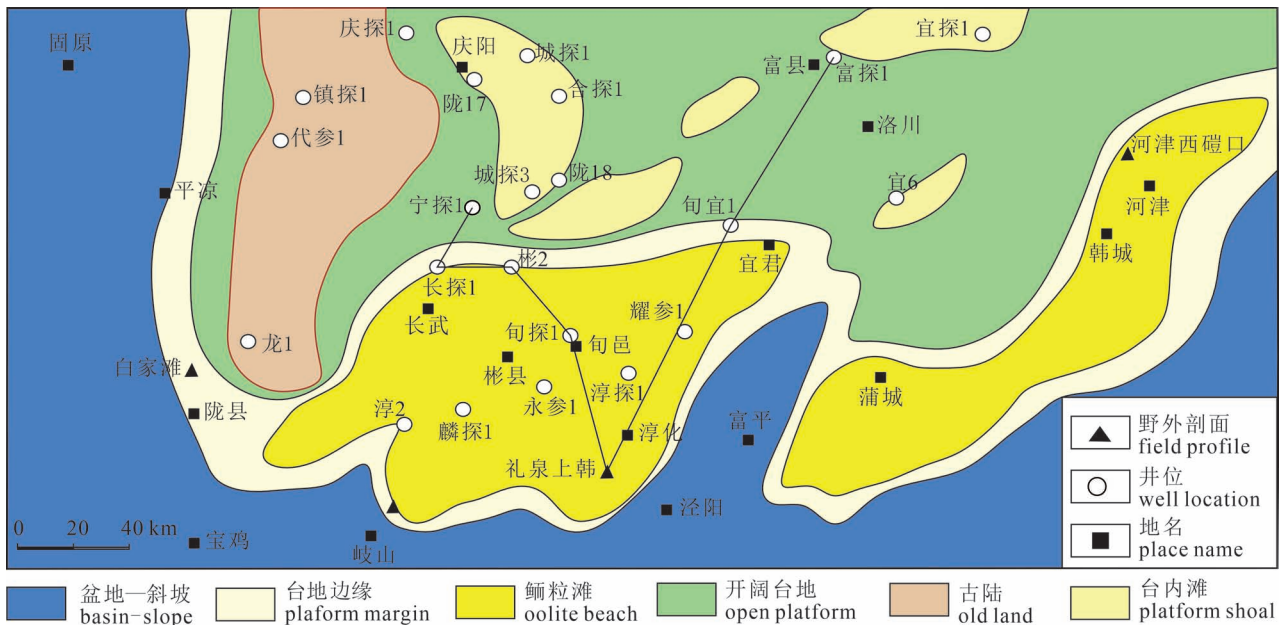


图1 鄂尔多斯盆地南部地区寒武纪张夏期沉积相图(据李维岭等, 2021 修改)

Fig. 1 Sedimentary facies map of the Cambrian Zhangxia age in the southern Ordos Basin (modified from Li Weiling et al., 2021&)

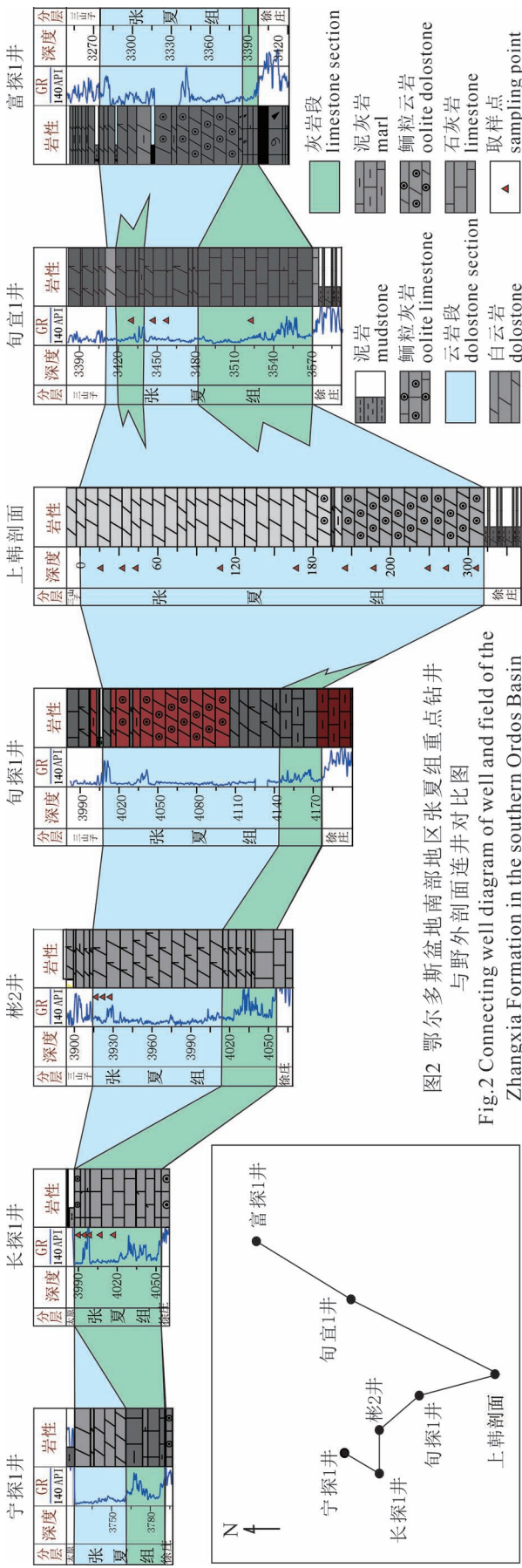


图2 鄂尔多斯盆地南部地区张夏组重点钻井与野外剖面连井对比图
Fig.2 Connecting well diagram of well and field of the Zhangxia Formation in the southern Ordos Basin

性。在旬探1井、宁探1井、灵1井、淳探1井、麟探1井、陇17井、陇18井、陇29井、彬2井(郝哲敏, 2017;张春林等, 2021;李维岭等, 2021)以及礼泉上韩剖面都有发育储层, 尤其整个上韩剖面都可见各种类型孔隙和裂缝(图 3a—f), 但是, 盆地内富探1井、旬宜1井、长探1井则基本不发育(图 3g, h)。

张夏组储层主要发育在白云岩之中, 主要岩石类型有两类:(残余)鲕粒—砂屑白云岩、细—中晶白云岩。(残余)鲕粒—砂屑灰岩、粉晶白云岩中储层发育相对较差。

(1) (残余) 鲕粒—砂屑白云岩: 在淳探1井、旬探1井、宁探1井、灵1井、宜2井和上韩井剖面, 都发育该类岩石(郝哲敏, 2017;张春林等, 2021;李维岭等, 2021)。颜色多为灰色, 白云石一般为粉晶—细晶, 晶体半自形—他形。颗粒成分主要为鲕粒, 少数为砂屑, 多表现为残余鲕粒或砂屑幻影(图 4a—c)。部分完全白云岩化样品中, 鲕粒内部与胶结物白云石形态略有差异, 白云石在鲕粒内相较于胶结物小、脏、相对自形。在未完全白云岩化的样品之中, 也能发现鲕粒内部先于胶结物发生白云石化(图 4a—c), 内部白云石多为自形。

(2) 细—中晶白云岩: 在淳探1井、彬2井和上韩井剖面, 见到该类岩石(邓昆等, 2010;郝哲敏, 2017;张春林等, 2021;李维岭等, 2021)。颜色多为灰色—浅灰色, 一般白云石晶体越粗, 岩石的颜色越浅。白云石晶体大小从细晶到中晶, 晶体半自形—他形, 大部分镶嵌接触(图 4e—g)。

2.3 储层孔隙特征

张夏组白云岩的储集空间主要有溶蚀孔洞、裂缝及扩大溶孔、粒间孔。

溶蚀孔洞、裂缝及扩大溶孔相伴生。溶蚀孔洞在岩芯和剖面上, 多表现为不规则状、针孔状, 具有非选择性, 孔径可达 10 cm, 孔隙内多有鞍状白云石和少量的石英半充填(图 3d—f)。裂缝多以沿层近水平缝和网状裂缝为主, 其中也有白色白云石充填, 与暗色基质组成“斑马纹”(图 3a—c)。在钻井样品中, 也能见到被方解石充填的裂缝。粒间溶孔在部分钻井能见到(李相博等, 2021), 主要发育在鲕粒间, 孔隙内有少量的白云石充填。

以上韩剖面为例, 张夏组上下部岩石类型以及储层类型存在差异。下部为含裂缝的深灰色—灰色鲕粒云岩, 向上裂缝变少。裂缝以沿层面水平缝为主干裂缝, 沿主裂缝延伸出羽状的次级裂缝。裂缝内充填乳白色鞍状白云石, 与深色基质鲕粒白云岩,

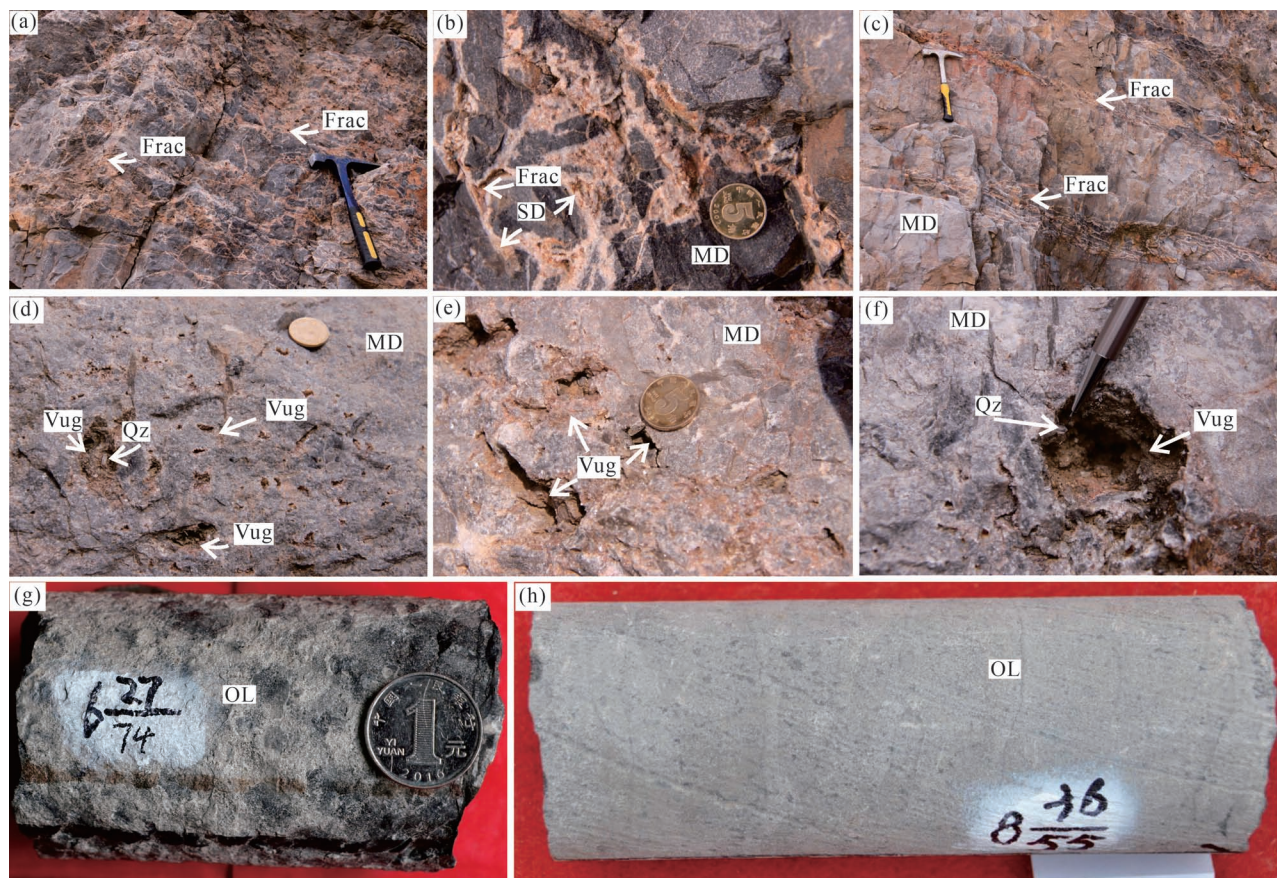


图3 鄂尔多斯盆地南部张夏组野外剖面及岩芯照片

Fig. 3 Field profile and core photos of the Zhangxia Formation in the southern Ordos Basin

上韩剖面张夏组下部(a)—(c): (a) 深灰色鲕粒白云岩, 岩石破碎严重, 裂缝内有白色白云石充填; (b) 深灰色鲕粒白云岩, 岩石破碎严重, 角砾间有白色白云石充填, 存在残余空间, 为图 a 局部放大; (c) 沿层发育的裂缝, 斑马结构, 沿主裂缝发育羽状的次级裂缝, 白色白云石充填。上韩剖面张夏组中上部(d)—(f): (d) 粉细晶白云岩中密集分布溶蚀孔洞, 内有白云石和石英; (e) 粉细晶白云岩中的不规则溶洞, 内有白云石和石英, 为图 d 局部放大; (f) 粉细晶白云岩中的不规则溶洞, 内有白云石和石英, 为图 d 局部放大。(g) 长探 101 井张夏组, 深灰色鲕粒灰岩, 岩石致密, 6(27/74); (h) 旬宜 1 井, 张夏组, 灰色含竹叶状砾屑鲕粒灰岩, 岩石致密, 8(36/55)。Frac—裂缝; SD—鞍状白云石; MD—基质白云石; Vug—溶蚀孔洞; Qz—石英; OL—鲕粒灰岩

(a) — (c) The lower part of the Zhangxia Formation, Shanghan section: (a) dark grey oolitic dolostone, severely fractured, with white dolomite filling in the fractures; (b) dark grey oolitic dolostone, severely fractured, with white dolomite filling in the corners of the gravels, with residual space, local enlargement of Fig. a; (c) cracks along the layer, zebra structure, and feather-like secondary fractures along the main fractures, white dolomite filling. (d) — (f) the middle—upper parts of the Zhangxia Formation, Shanghan section: (d) dissolution pores densely distributed in powdered fine-crystalline dolostone, with dolomite and quartz; (e) irregular dissolution pores in fine-crystalline dolostone, with dolomite and quartz; partially enlargement of Fig. (d); (f) irregular dissolution pores in fine-crystalline dolostone, with dolomite and quartz; partially enlargement of Fig. (d). (g) the Well Changtan 101, the Zhangxia Formation, dark grey oolitic limestone, denserock, 6 (27/74); (h) the Well Xunyi 1, the Zhangxia Formation, grey oolitic limestone, with bamboo-leaf-like conglomerate, dense rock, 8 (36/55). Frac—fracture; SD—saddle dolomite; MD—matrix dolomite; Vug—dissolution pore; Qz—quartz; OL—oolitic limestone

构成了呈现出雁形式斑马纹的特征(图 3a—c)。向上裂缝明显减少变细。在显微镜下, 鞍状白云石呈巨晶, 具有环带结构, 部分裂缝内有晶体碎片和孔隙残余(图 4a—c)。张夏组上部岩性主要为细中晶白云岩, 鲕粒结构已经不明显, 晶体更粗, 在显微镜下呈他形镶嵌接触, 储集空间由裂缝为主演变为以溶蚀孔洞为主, 孔洞内有白云石和石英充填

(图 3e, f)。

张夏组的孔隙度差异较大, 但仅发育在白云岩段。岩芯分析鄂尔多斯盆地东南部张夏组样品最大值为 6.85% (郑浩夫, 2015)。按发育沉积相带分, 台缘鲕粒白云岩储层测井孔隙度介于 1.0% ~ 6.3%, 平均为 2.0%; 台内鲕粒白云岩储层测井孔隙度介于 1.0% ~ 18.6%, 平均为 3.3% (李维岭,

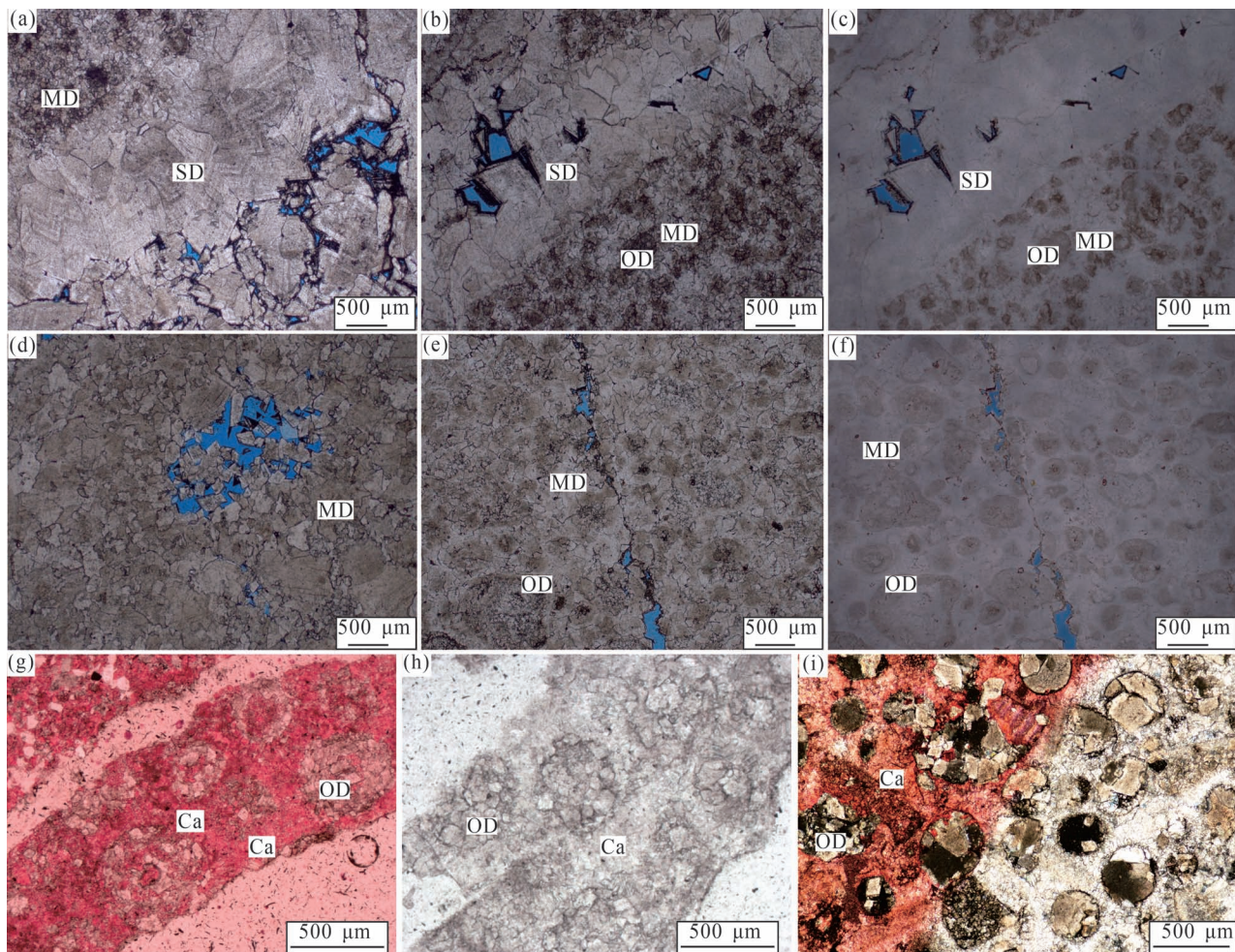


图 4 鄂尔多斯盆地南部张夏组显微镜下照片

Fig. 4 Microscope photos of the Zhangxia Formation in the southern Ordos Basin

(a) — (c) 上韩剖面张夏组下部: (a) (残余) 鲕粒白云岩, 发育裂缝, 内有环带状鞍状白云石充填, 有残余储集空间, 单偏光; (b) (残余) 鲕粒白云岩, 发育裂缝, 裂缝切割鲕粒, 内有鞍状白云石充填, 有残余储集空间, 单偏光; (c) (残余) 鲕粒白云岩, 发育裂缝, 裂缝切割鲕粒, 内有鞍状白云石充填, 有残余储集空间, 鲕粒结构更加清楚, 单偏光加白纸遮挡, 与 b 相同视域。(d) — (e) 上韩剖面张夏组中上部: (d) (残余鲕粒) 粉细晶白云岩, 不规则状溶蚀孔洞, 内有白云石充填, 可见颗粒幻影结构, 单偏光; (e) (残余鲕粒) 粉细晶白云岩, 发育有裂缝, 可见颗粒幻影结构, 裂缝切割颗粒, 单偏光; (f) (残余鲕粒) 粉细晶白云岩, 发育有裂缝, 鲕粒结构清晰, 大小不均一, 裂缝切割颗粒, 单偏光加白纸遮挡。(g) 长探 1 井张夏组, 云质鲕粒灰岩, 可见鲕粒幻影, 白云石为粉晶自形, 仅在鲕粒内部, 粒间为亮晶方解石, 岩屑, 单偏光; (h) 彬 2 井张夏组, 云质鲕粒灰岩, 可见鲕粒幻影, 白云石为粉晶自形, 仅在鲕粒内部发生, 粒间为亮晶方解石, 岩屑, 单偏光; (i) 旬宜 1 井张夏组, 云质鲕粒灰岩, 可见鲕粒幻影, 白云石为粉晶自形, 仅在鲕粒内部发生, 粒间为亮晶方解石, 正交偏光。SD—鞍状白云石; MD—基质白云石; Ca—方解石; OD—鲕粒白云石

(a) — (c) Lower part of Zhangxia Formation, Shanghan section: (a) residual oolitic dolomite, developing fractures, filled with ring-banded saddle dolomite, with residual storage space, plane polarized light; (b) residual oolitic dolomite, developing fractures, which cutting oolites, filled with saddle dolomite, plane polarized light; (c) (residual) oolitic dolomite, fractures, which cutting oolites, filled with saddle dolomite, with residual pores, the oolitic structure was more clear; plane polarized light, with a white paper mask; the field of view is the same as that of Fig. b. (d) — (f) Middle—upper part of the Zhangxia Formation, the Shanghan section: (d) (residual ooids) fine crystalline dolostone, with irregular dissolution pores, filled with dolomite, particle phantom structure; plane polarized light; (e) (residual ooids) fine crystalline dolostone, fractures and particle phantom structures; fractures cutting particles, single polarised light; (f) (residual ooids) fine crystalline dolostone, cracks, clear oolitic structure, uneven grain size; fractures cutting particles; plane polarized light, with a white paper mask. (g) the Zhangxia Formation in the Well Changtan 1: dolomitic oolitic limestone, oolitic phantom, fine dolomite euhedral crystal only found within ooids, sparry calcite situated between particles!, plane polarized light; (h) the Zhangxia Formation in the Well Bin 2: dolomitic oolitic limestone, oolitic phantom, powdery euhedral dolomite crystal only found within ooids, sparry calcite situated between particles!; plane polarized light; (i) the Zhangxia Formation in the Well Xunyi 1: dolomitic oolitic limestone, oolitic phantom, powdery euhedral dolomite crystal only found within ooids, sparry calcite situated between particles!; plane polarized light. SD—saddle-shaped dolomite; MD—matrix dolomite; Ca—calcite; OD—dolomitic ooid

2021)。长探1井、彬2井、旬宜1井张夏组测井孔隙度普遍小于2%，宁探1井储层段测井孔隙度为4.8%，麟探1井张夏组实测孔隙度最大3.11%，旬探1井张夏组实测孔隙度最大2.87%，彬1井张夏组储层段测井孔隙度可达6%，上韩剖面张夏组储层段面孔率最大可达10%。

3 地球化学特征

本次研究利用微区取样对张夏组基质岩石和孔隙充填物分别进行地球化学分析,进而判断张夏组关键成岩作用的流体来源和发生时间,进而来判断储层的形成机制。

3.1 碳氧同位素

张夏组基质岩石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值较为接近,长探1井基质灰岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值范围在 $-1.0\text{‰} \sim -2.5\text{‰}$ 之间,仅有1个样品为 -7.5‰ (图5),上韩剖面张夏组基质白云岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 范围与之相近,在 $-1.4\text{‰} \sim -2.6\text{‰}$ 之间,与前人结果相近(郑浩夫,2015;李维岭等,2021)。胶结物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值差异较大,上韩剖面孔隙内的白云石充填物范围为 $-1.4\text{‰} \sim -2.6\text{‰}$ 之间;而长探1井裂缝内的方解石充填物较负,范围在 $-5.4\text{‰} \sim -6.2\text{‰}$ 之间。

张夏组岩石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值在各类碳酸盐矿物差异大,其中长探1井基质灰岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值在 $-3.9\text{‰} \sim -12.5\text{‰}$,低于其他地区的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值,长探1井裂缝内的方解石充填物更负,范围在 $-14.5\text{‰} \sim -14.7\text{‰}$ (图5)。上韩剖面张夏组基质白云岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值在 $-4.2\text{‰} \sim -9.1\text{‰}$,孔隙内的白云石充填物范围为 $-4.9\text{‰} \sim -8.3\text{‰}$,两者差异较小。

3.2 主微量元素

上韩剖面白云岩储层的主量元素分析显示,白云石都具有较高的 Mg/Ca 值,均值在 0.935 以上,接近化学计量白云石。 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 MnO 含量都随着 Mg/Ca 值的增加而大致呈减少趋势, $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量不高,最高为 0.306%,最低为 0.078%。 MnO 含量范围在 0.019%~0.036%(图6),随着白云石结晶成熟,Fe 和 Mn 含量逐渐降低。

微量元素 Sr 含量表现得与 Fe 和 Mn 含量恰恰相反。含量都随着 Mg/Ca 含量的增加而增加。SrO 含量范围在 46.2~79.4 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。

3.3 稀土元素

上韩剖面白云岩的稀土元素含量较低, ΣREE 值在 1.69~6.05,平均值为 3.60,小于 10, Y/Ho 平均值 35.13, La/Yb(SN) 小于 0.44~0.78。经 PAAS

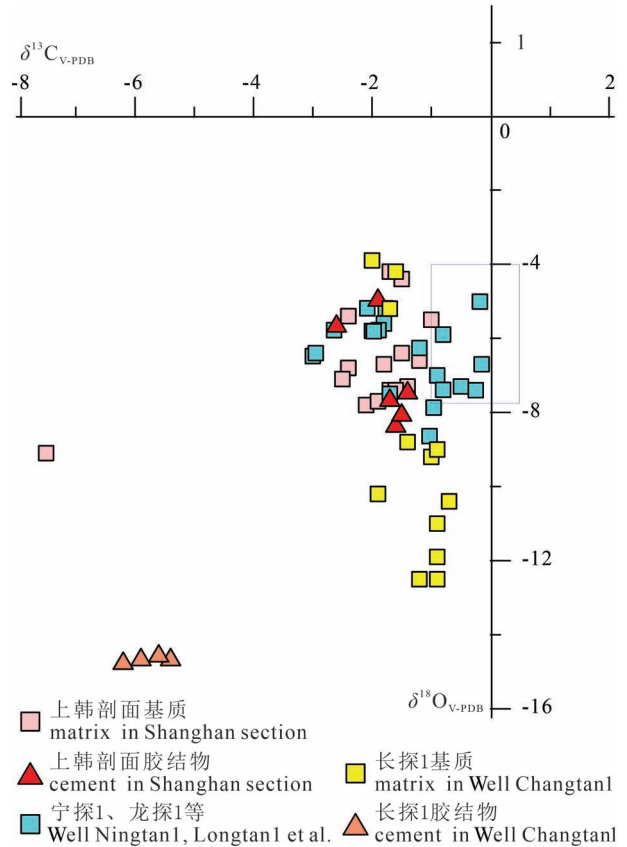


图5 鄂南地区张夏组碳—氧同位素图解(宁探1井与龙探1井数据来自郑浩夫,2015;虚线框为李维岭等,2021)

Fig. 5 Carbon—oxygen isotope diagram of the Zhangxia Formation in the southern Ordos Basin (the data of the Well Ningtan 1 and the Well Longtan 1 are from Zheng Hao-fu, 2015&; while the dashed boxes are sourced from Li Weiling et al., 2021&)

标准化以后,稀土配分曲线表现出重稀土和轻稀土低,中稀土富集的特征,上凸形态,普遍可见 Y 富集和 Ce 亏损, δCe 值在 0.80~0.94,平均值为 0.85; δEu 平均值为 1.05,之间,仅有一例样品中发现有轻微的 Eu 异常, δEu 值为 1.26(图7)。

3.4 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值

上韩剖面中的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值范围在 0.708859~0.709369(图8),低于古隆起附近的白云岩的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值(李维岭等,2021)。与同时期海水值较为接近(Weizer et al., 1999),说明白云岩化流体主要来自于海水。 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值与 Mg/Ca 值大致呈正相关,最高的 Mg/Ca 值具有最高的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值,最低的 Mg/Ca 值具有最低的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值,说明伴随着白云岩化作用继续, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值逐渐增加。

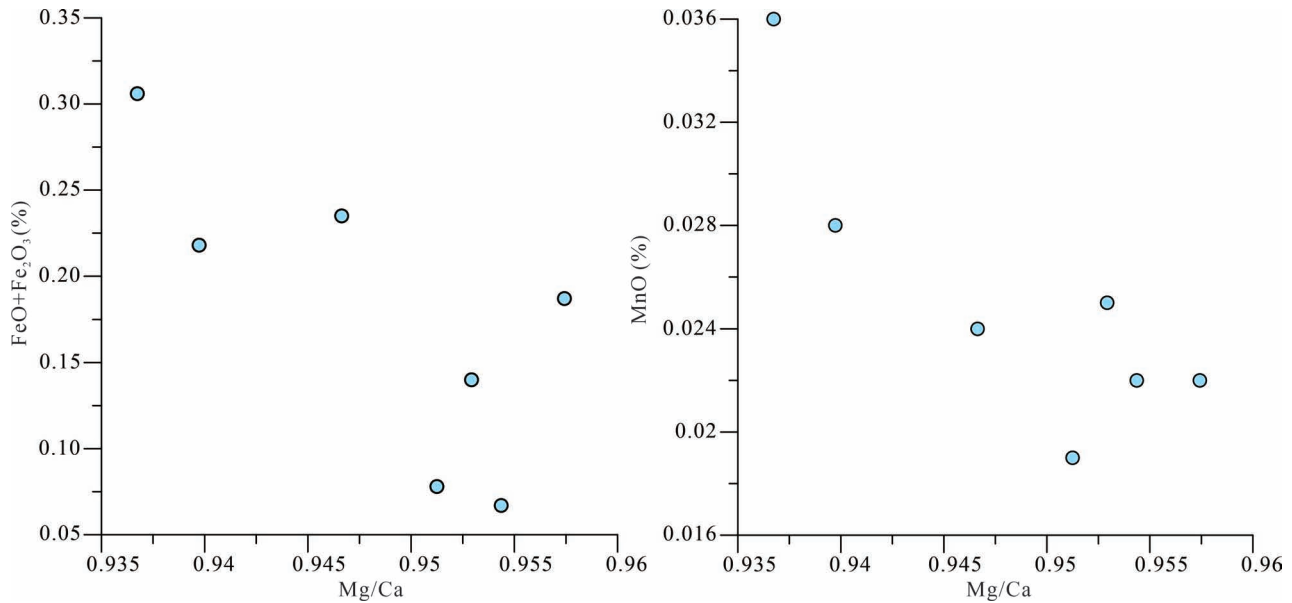


图 6 鄂尔多斯盆地南部地区张夏组白云岩 Fe—Mg/Ca(a)、Mn—Mg/Ca(b) 图解

Fig. 6 Fe—Mg/Ca(a)、Mn—Mg/Ca(b) diagram of the Zhangxia Formation in the southern Ordos Basin

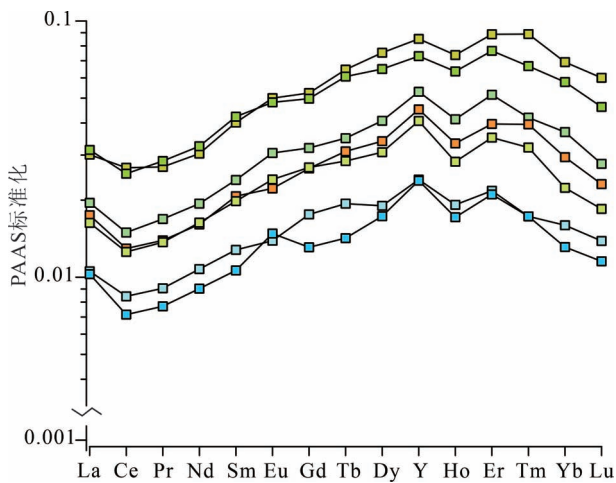


图 7 鄂尔多斯盆地南部地区张夏组白云岩
稀土元素配分曲线

Fig. 7 REE distribution curve of the Zhangxia Formation
in the southern Ordos Basin

4 储层主控因素分析

张夏组储层是在鲕粒滩沉积发育基础上,经历了白云岩化作用、岩溶作用和断裂作用改造,这些后期改造作用都可能与怀远运动有一定的联系。怀远运动是华北地区早古生代一次重要的区域性构造运动,从中寒武世张夏沉积期到早奥陶世马家沟组沉积前,引发了一系列的白云岩化作用、岩溶作用和断

裂活动(张军涛等,2023)。

4.1 鲕粒滩

鲕粒滩等高能相带中往往是优质碳酸盐岩储层发育的基础,如川中地区安岳气田龙王庙组和川东北地区普光气田飞仙关组沉积环境都属于鲕粒滩相(马永生等,2010,2019)。鄂尔多斯盆地张夏组鲕粒分布更为普遍,鄂尔多斯盆地南部地区几乎所有钻井和野外剖面都有足够厚度的鲕粒灰岩或鲕粒白云岩发育(图 2),但是张夏组的储层分布却十分有限,仅在少量的钻井或剖面上发育储层。如长探 1 井和旬宜 1 井取芯段都能见到厚层的鲕粒,但是却几乎不发育储层(图 3g,h)。

旬探 1、宁探 1 等部分钻井见到受原始组构控制的粒间孔。而在储层厚度最大的上韩剖面,有效的储集空间不受原始组构控制,甚至裂缝切割早期的鲕粒(图 4a—c)。由此可以推测,至少很大一部分储集层形成并不受原始的相带控制。

由此可见,虽然鲕粒滩是张夏组储层发育的基础,但仅仅发育鲕粒滩并不足够,还需要经历白云岩化和溶蚀作用的改造。

4.2 白云岩化作用

白云岩化作用也是形成滩相碳酸盐岩储层的关键因素(马永生等,2010,2019),本区内张夏组储层也绝大多数发育在白云岩之中。但是,白云岩相较于鲕粒滩在鄂尔多斯盆地南部张夏组之中分布要局

限的多,且非常不均一。平面上,白云岩大致表现为南部厚,向北变薄,旬探1井、麟探1井、岐山二郎沟、上韩剖面一带白云岩厚度较大,其中上韩剖面最大可达300 m,而长探1井、旬宜1井附近白云岩程度较小(图2),至东北部的河津西磴口等地白云岩已基本不发育。在纵向上,大部分钻井都呈现出上部为云岩、下段为灰岩的特征,长探1井顶部纯白云岩段可能被剥蚀,但也有少量的云质灰岩存在,其他钻井也都或多或少的有白云岩存在(图2、图4g—i)。并非所有的鲕粒滩都发育白云岩化,也反映了白云岩化并非是共生—准共生期相控型的。

全区不同钻井和剖面的张夏组白云岩的矿物学特征较为相似,都具有相对较粗的晶体,结晶程度也相对较好以半自形—他形为主(图2、图4),而同生期—准同生期蒸发环境萨布哈白云岩化作用形成的白云石,往往具有泥粉晶、他形晶体(Manche and Kaczmarek, 2019)。同时,张夏组白云石具有较高的Mg/Ca值,这些特征都说明白云石生长速度较慢,形成于浅埋藏—埋藏期(Zhang Juntao et al., 2009)。

虽然白云岩化作用发生在浅埋藏期,但白云岩化流体仍以海水为主。首先,基质白云石的 Sr^{87}/Sr^{86} 值和 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值接近寒武纪海水值(Veizer et al., 1999),说明白云岩化及后期充填流体受热液和大气降水影响不大,应主要来自于同时期海水(Zhu Dongya et al., 2019; Riechelmann et al., 2020)。较低 ΣREE 值与海水相近,稀土配分模式都具有较明显的Ce负异常和Y正异常,也呈现出白云岩化流体主要为海水的特征(赵彦彦等, 2019)。其次,微量元素Sr含量都随着Mg/Ca含量的增加而增加,因为Sr主要来源于海水,随着白云石结晶成熟,Sr含量增加,也说明白云岩化流体来自于海水(黄思静等, 2006)。再者,而Fe和Mn含量则更多地反映了外来流体的影响,白云岩中Fe和Mn含量并不高,而且随Mg/Ca值即白云岩化程度增加而大致降低,也说明白云岩化流体并非埋藏期外来流体(Zhang Juntao et

al., 2009)。

因此,张夏组白云岩化时期为埋藏期后,大致为怀远运动初期。其时,华北克拉通西部最先启动,开始大幅度隆升,形成了厚层的三山子组白云岩(张军涛等, 2023),同时白云岩化流体自上而下运移,使得张夏组发生白云岩化,同时也表现出白云岩“上多下少”,“南多北少”的特征。

4.3 岩溶作用

张夏组沉积后,存在有怀远运动和加里东—海西运动2期较大的不整合。怀远运动相关岩溶发生在三山子组大规模白云岩化作用之后,但是影响时间在鄂尔多斯盆地表现出很大的差异性,鄂尔多斯盆地南部大部分地区暴露时间较短,张夏组之后还存在有三山子组、冶里组和亮甲山组沉积(李相博等, 2021)。因大部分地区上覆有巨厚的三山子组、冶里组、亮甲山组和马家沟组地层,加里东—海西运动相关岩溶作用对张夏组影响仅局限在镇原古隆起周缘。

在古隆起周缘岩溶作用对储层有一定的改造,彬2井、宁探1井、灵1井、陇17井、陇18井、陇29井等受到2期岩溶作用影响,也都发育储层。而远离古隆起的旬探1井、淳探1井、麟探1井以及上韩剖面储层也发育,可能需要断裂的沟通才能受岩溶作用影响(图2)。

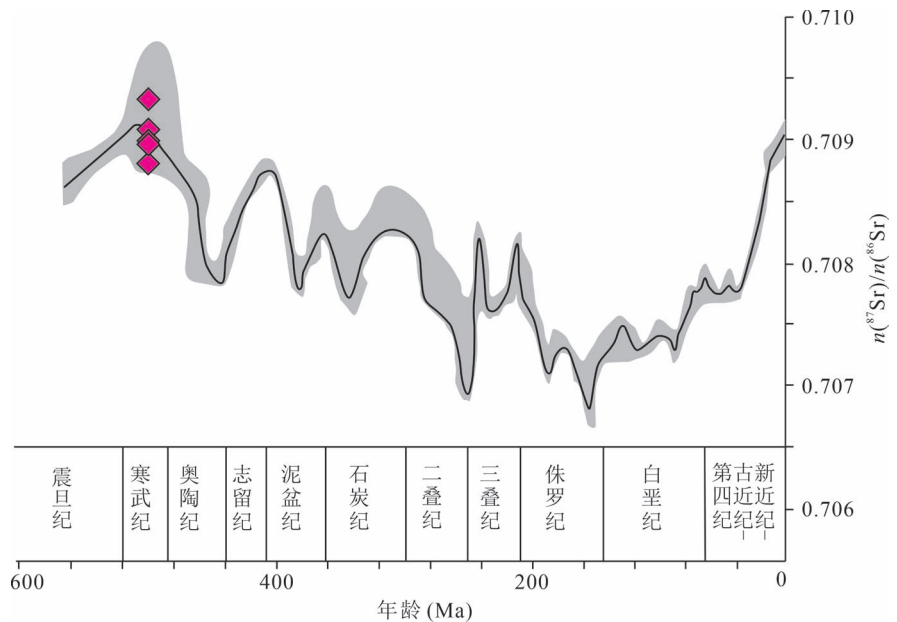


图8 鄂尔多斯盆地南部地区张夏组白云岩 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 值与海水变化曲线(海水 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 值曲线来自Veizer et al., 1999)

Fig. 8 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ value of the Zhangxia Formation in the southern Ordos Basin (the $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ value curve of seawater from Veizer et al., 1999)

张夏组胶结物和基质的同位素特征,也能见到古隆起附近和远离古隆起的差异,古隆起附近的长探 1 井的基质较其他井的值明显地负偏,胶结物甚至达到了 $-14.5‰ \sim -14.7‰$,反映了其受大气降水影响较大(Zhu Dongya et al., 2019),古隆起附近钻井具有较高的 Sr^{87}/Sr^{86} 值,也说明受到过大气淡水的影响(李维岭等,2021)。储层发育最好的上韩剖面大气淡水作用影响并不明显。在层位上,上覆三山子组和冶里亮甲山组远离怀远运动不整合面;之上还有巨厚的马家沟组、平凉和背锅山组等地层,更加远离加里东期不整合面。地球化学数据上, Sr^{87}/Sr^{86} 值、 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 、REE 等数据也没有明显大气水改造的痕迹。

4.4 破裂作用

早寒武世至中寒武世,受南缘秦岭海槽扩张的影响,处于被动大陆边缘构造环境,表现为伸展拉张的应力背景(何发岐等,2022)。晚寒武世怀远运动开始,盆地的构造应力场由拉伸向挤压过渡。前期研究也认为,寒武纪的断裂不仅控制了有利滩相的发育,同时也控制了寒武系优质储集层的分布(魏国齐等,2022)。

就裂缝的发育时间来看,裂缝内充填的鞍状白云石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{V-PDB}$ 值和 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 值数据也显示流体为寒武纪海水(Veizer et al., 1999),说明断裂的形成时期也应为寒武纪。对应于寒武纪末期怀远运动时。裂缝和孔隙内有鞍形白云石存在以及部分样品有轻微的 Eu 正异常,则说明裂缝活动时,也带来了一定增温效应(赵彦彦等,2019)。

储层岩石学特征上,上韩剖面中张夏组优质白云岩储层也都与裂缝密切相关。下部储层裂缝切割早期鲕粒(图 4a—c),形成最主要的储集空间;上部储层中溶孔和溶洞也是多在裂缝基础上扩大溶蚀形成。这些都说明对远离古隆起区,缺少岩溶改造的张夏组储层,寒武纪末断裂活动相关的破裂作用及其相关的白云岩化作用,是储层形成的关键因素。

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地南部张夏组鲕粒滩广泛分布,储层岩石主要为(残余)鲕粒—砂屑白云岩、细—中白云岩,储集空间有溶蚀孔洞、裂缝及扩大溶孔、粒间孔。

(2) 鄂尔多斯盆地南部张夏组白云岩化作用主要发生在浅埋藏期。寒武纪末开始的怀远运动引起

区域性抬升,使得海水变浅,发生了三山子组大规模的白云岩化作用,浓缩海水并沿断裂裂缝下渗,使处于浅埋藏期张夏组鲕粒也发生白云岩化作用,这也造成了白云岩分布在层段上“上多下少,南多北少”的特征和区域上分布非均质性。

(3) 鄂尔多斯盆地南部镇原古隆起周缘,张夏组储层主要受怀远运动和加里东—海西运动岩溶作用影响。

(4) 鄂尔多斯盆地南部远离镇原古隆起区,张夏组储层主要受控于怀远运动裂缝破裂作用。怀远运动相关的破裂作用,一方面产生大量的裂缝,形成储集空间;另一方面裂缝还为热液流体和大气降水提供通道,发生溶蚀作用和白云岩化作用,形成了张夏组白云岩储层。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈启林,白云来,马玉虎,刘晓光. 2013. 再论鄂尔多斯盆地寒武纪岩相古地理及沉积构造演化. 吉林大学学报(地球科学版), 43(6): 1697~1715.
- 邓昆,张哨楠,周立发,丁晓琪. 2010. 鄂尔多斯张夏期原型盆地类型与油气勘探前景. 石油实验地质, 32(5): 442~446+452.
- 狄明信,管守锐,黄醒汉. 1986. 华北地区中寒武世张夏期沉积相及古地理. 华东石油学院学报(自然科学版), 10(1): 1~14.
- 郝哲敏. 2017. 鄂尔多斯盆地寒武系张夏组和三山子组储层形成机理研究. 导师: 陈洪德. 成都: 成都理工大学博士学位论文.
- 何发岐,王付斌,郭利果,安川. 2022. 鄂尔多斯盆地古生代原型盆地演化与构造沉积格局变迁. 石油实验地质, 44(3): 373~384.
- 何发岐,黄雷,贾会冲,张茹,张威,王朝,黎小伟. 2024. 鄂尔多斯盆地走滑断裂特征及控油气效应. 地质学报, 网络首发.
- 何发岐,王付斌,郭利果,安川. 2022. 鄂尔多斯盆地古生代原型盆地演化与构造沉积格局变迁. 石油实验地质, 44(3): 373~384.
- 胡晨林. 2023. 鄂尔多斯盆地寒武系碳酸盐岩台地相模式及其对古气候的响应. 地质论评, 69(S1): 17~18.
- 黄军平,井向辉,张艳,李涵,张雷,李相博. 2024. 鄂尔多斯盆地寒武系储层沥青地质特征及来源分析. 地质学报, 网络首发.
- 黄思静, Qing Hairuo, 裴昌蓉, 胡作维, 吴素娟, 孙治雷. 2006. 川东三叠系飞仙关组白云岩铍含量、铍同位素组成与白云石化流体. 岩石学报, 22(8): 2123~2132.
- 李维岭,周进高,吴兴宁,吴东旭,王少依,丁振纯,于洲. 2021. 鄂尔多斯盆地南缘中寒武统张夏组鲕粒滩相储层特征及主控因素. 海相油气地质, 26(1): 25~34.
- 李相博,王宏波,黄军平,张才利,张艳,王雅婷,张雷,王菁,刘化清. 2021. 鄂尔多斯盆地怀远运动不整合面特征及油气勘探意义. 石油与天然气地质, 42(5): 1043~1055.
- 刘化清,李相博,马玉虎,白云来,黄军平. 2021. 鄂尔多斯盆地怀远运动不整合面与深层天然气勘探领域. 天然气工业, 41(6): 1~12.
- 刘晓光,陈启林,白云来,马玉虎,魏立花. 2012. 鄂尔多斯盆地中寒武统张夏组沉积相特征及岩相古地理分析. 天然气工业, 32(5): 14~18+99.

- 马尚伟, 魏丽, 赵飞, 张正涛, 魏建设, 王鹏, 尹小龙, 赵琳雁. 2023. 鄂尔多斯盆地靖边气田奥陶系马家沟组热液活动特征及油气地质意义. 天然气地球科学, 34(10): 1726~1738.
- 马永生, 蔡勋育, 李慧莉, 朱东亚, 张军涛, 杨敏, 段金宝, 邓尚, 尤东华, 武重阳, 陈森然. 2023. 深层—超深层碳酸盐岩储层发育机理新认识与特深层油气勘探方向. 地质学前沿, 30(6): 1~13.
- 马永生, 蔡勋育, 云露, 李宗杰, 李慧莉, 邓尚, 赵培荣. 2022. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展. 石油勘探与开发, 49(1): 1~17.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 张学丰. 2010. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式——以四川普光气田为例. 地质学报, 84(8): 1087~1094.
- 马永生, 何治亮, 赵培荣, 朱宏权, 韩俊, 尤东华, 张军涛. 2019. 深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展. 石油学报, 40(12): 1415~1425.
- 齐荣, 李国蓉, 张军涛, 王付斌, 李宇翔, 杨飞, 刘璐, 何赛, 田家奇, 李肖肖. 2024. 鄂尔多斯盆地富县地区马家沟组热液改造特征与研究意义. 古地理学报, 26(3): 632~643.
- 宋冀南. 2001. 对怀远运动的再认识. 山东地质, 17(1): 19~23+51.
- 魏国齐, 朱秋影, 杨威, 张春林, 莫午零. 2019. 鄂尔多斯盆地寒武纪断裂特征及其对沉积储集层的控制. 石油勘探与开发, 46(5): 836~847.
- 吴浩文, 苏中堂, 裴文超, 魏柳斌, 任静, 张成弓, 付斯一. 2024. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义. 地质论评, 录用待刊.
- 于洲, 胡子见, 王前平, 赵静, 吴东旭, 吴兴宁, 李维岭, 鲁慧丽, 朱文博. 2023. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系深层白云岩储集层特征及主控因素. 古地理学报, 25(4): 931~944.
- 张春林, 邢凤存, 张月巧, 姜福杰, 徐旺林, 张阿敏. 2023. 鄂尔多斯盆地早古生代庆阳和乌审旗古隆起构造演化及其对寒武系岩相古地理的控制. 石油与天然气地质, 44(1): 89~100.
- 张春林, 姚涪利, 李程善, 邢凤存, 范立勇, 莫午零, 朱秋影, 曾旭. 2021. 鄂尔多斯盆地深层寒武系碳酸盐岩储层特征与主控因素. 石油与天然气地质, 42(3): 604~614.
- 张军涛, 张玉银, 谷宁, 金晓辉, 张涛, 刘四洪, 贾会冲, 杨佳奇, 刘玲, 高晓鹏. 2023. 鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东北侧怀远运动不整合特征及其对岩溶储层形成的意义. 石油与天然气地质, 44(1): 101~109.
- 赵彦彦, 李三忠, 李达, 郭玲莉, 戴黎明, 陶建丽. 2019. 碳酸盐(岩)的稀土元素特征及其古环境指示意义. 大地构造与成矿学, 43(1): 141~167.
- 郑浩夫. 2015. 鄂尔多斯盆地东南部张夏组和三山子组储层特征研究. 导师: 陈洪德. 成都: 成都理工大学硕士学位论文.
- 周进高, 付金华, 于洲, 吴东旭, 丁振纯, 李维岭, 唐瑾. 2020. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩主要储层类型及其形成机制. 天然气工业, 40(11): 20~30.
- 周进高, 席胜利, 邓红婴, 于洲, 刘新社, 丁振纯, 李维岭, 唐瑾. 2020. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征. 天然气工业, 40(2): 41~53.
- Chen Qilin, Bai Yunlai, Ma Yuhu, Liu Xiaoguang. 2013&. Further study on lithofacies palaeogeography and sedimentary—tectonic evolution of Cambrian in Ordos Basin, North China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 43(6): 1697~1715.
- Deng Kun, Zhang Shaonan, Zhou Lifa, Ding Xiaoqi. 2010&. The prototype basin of Cambrian Zhangxia period and oil—gas exploration prospect in the Ordos Basin. Petroleum Geology & Experiment, 32(5): 442~446+452.
- Di Mingxin, Guan Shourui, Huang Xinghan. 1986&. The sedimentary facies and palaeogeography of middle cambrian period Zhang Xia epoch in North China. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 10(1): 1~14.
- Hao Zhemin. 2017&. Study on the reservoir mechanism of Cambrian Zhangxia and sanshanzi formation, Ordos Basin. Supervisor: Chen Hongde. Chengdu: Chengdu University of Technology Doctoral Dissertation.
- He Faqi, Huang Lei, Jia Huichong, Zhang Ru, Zhang Wei, Wang Chao, Li Xiaowei. 2024. Characteristics of strike-slip fault and their oil—gas-controlling effect in the Ordos basin. Acta Geologica Sinica, in press.
- He Faqi, Liang Chengchun, Lu Cheng, Yuan Chunyan, Li Xiaowei. 2020&. Identification and description of fault—fracture bodies in tight and low permeability reservoirs in transitional zone at the south margin of Ordos Basin. Oil and Gas Geology, 41(04): 710~718.
- He Faqi, Wang Fubin, Guo Ligu, An Chuan. 2022&. Evolution of prototype basin and change of tectonic—sedimentary pattern in Paleozoic, Ordos Basin. Petroleum Geology & Experiment, 44(3): 373~384.
- Hu Chenlin. 2023&. Platform facies model of CAMBRIAN carbonate rocks in Ordos Basin and its response to paleoclimate. Geological Review, 69(S1): 17~18.
- Huang Junping, Jing Xianghui, Zhang Yan, Li Han, Zhang Lei, Li Xiangbo. 2024. Geological characteristics and origin analysis of bitumen in Cambrian reservoirs of Ordos basin. Acta Geologica Sinica, in press.
- Huang Sijing, Qing Hairuo, Pei Changrong, Hu Zuwei, Wu Sujuan, Sun Zhilei. 2006&. Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids in the Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan of China. Acta Petrologica Sinica, 22(8): 2123~2132.
- Li Weiling, Zhou Jingao, Wu Xingning, Wu Dongxu, Wang Shaoyi, Ding Zhenchun, Yu Zhou. 2021&. Characteristics of oolitic shoal reservoir and its main controlling factors of Zhangxia Formation in the southern margin of Ordos Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 26(1): 25~34.
- Li Xiangbo, Wang Hongbo, Huang Junping, Zhang Caili, Zhang Yan, Wang Yating, Zhang Lei, Wang Jing, Liu Huaqing. 2021&. Characteristics of unconformity resulted from Huaiyuan Movement in Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration. Oil & Gas Geology, 42(5): 1043~1055.
- Liu Huaqing, Li Xiangbo, Ma Yuhu, Bai Yunlai, Huang Junping. 2021&. The unconformity caused by the Huaiyuan movement and the deep natural gas exploration field in the Ordos Basin. Natural Gas Industry, 41(6): 1~12.
- Liu Huaqing, Li Xiangbo, Ma Yuhu, Bai Yunlai, Huang Junping. 2021. The unconformity caused by the Huaiyuan movement and the deep natural gas exploration field in the Ordos Basin, China. Natural Gas Industry B, 8(6): 539~551.
- Liu Xiaoguang, Chen Qilin, Bai Yunlai, Ma Yuhu, Wei Lihua. 2012&. Sedimentary facies and lithofacies palaeogeography of the Middle Cambrian Zhangxia Formation in the Ordos Basin. Natural Gas Industry, 32(5): 14~18+99.
- Ma Shangwei, Wei Li, Zhao Fei, Zhang Zhengtao, Wei Jianshe, Wang Peng, Yin Xiaolong, Zhao Linyan. 2023&. Characteristics of hydrothermal activity and petroleum geological significance of the Ordovician Majiagou Formation in Jingbian Gas Field, Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 34(10): 1726~1738.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Li Huili, Zhu Dongya, Zhang Juntao, Yang Min, Duan Jinbao, Deng Shang, You Donghua, Wu Chongyang,

- Chen Senran. 2023&. New insights into the formation mechanism of deep—ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata. *Earth Science Frontiers*, 30(6): 1~13.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Yun Lu, Li Zongjie, Li Huili, Deng Shang, Zhao Peirong. 2022&. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(1): 1~17.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Yun Lu, Li Zongjie, Li Huili, Deng Shang, Zhao Peirong. 2022. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(1): 1~20.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, Zhang Xuefeng. 2010&. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir; A case study from the puguang oilfield in Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1087~1094.
- Ma Yongsheng, He Zhiliang, Zhao Peirong, Zhu Hongquan, Han Jun, You Donghua, Zhang Juntao. 2019&. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 40(12): 1415~1425.
- Manche C J, Kaczmarek S E. 2019. Evaluating reflux dolomitization using a novel high-resolution record of dolomite stoichiometry; A case study from the Cretaceous of central Texas, USA. *Geology*, 47(6): 586~590.
- Qi Rong, Li Guorong, Zhang Juntao, Wang Fubin, Li Yuxiang, Yang Fei, Liu Lu, He Sai, Tian Jiaqi, Li Xiaoxiao. 2024&. Mechanism and significance of hydrothermal activity in the Majiagou Formation, Fuxian Area, Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 26(3): 632~643.
- Riechelmann S, Mavromatis V, Buhl D, Dietzel M, Immenhauser A. 2020. Controls on formation and alteration of early diagenetic dolomite: A multi-proxy $\delta^{44}/^{40}\text{Ca}$, $\delta^{26}\text{Mg}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 283(6): 167~183.
- Song Diannan. 2001&. Re-recognition of Huaiyuan movement. *Geology of Shandong*, 17(1): 19~23+51.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebner S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G, Strauss H. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161(1~3): 59~88.
- Wei Guoqi, Zhu Qiuying, Yang Wei, Zhang Chunlin, Mo Wuling. 2019&. Cambrian faults and their control on the sedimentation and reservoirs in the Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(5): 836~847.
- Wu Haowen, Su Zhongtang, Pei Wenchao, Wei Liubin, Ren Jing, Zhang Chenggong, Fu Shiyi. 2024. Zircon SHRIMP U-Pb ages and Hf isotope characteristics of the zircons from tuff in Ordovician Majiagou Formation in the central—eastern Ordos Basin and their geological significance. *Geological Review*, in press.
- Yu Zhou, Hu Zijian, Wang Qianping, Zhao Jing, Wu Dongxu, Wu Xingning, Li Weiling, Lu Huili, Zhu Wenbo. 2023&. Characteristics and main controlling factors of the Ordovician deep dolomite reservoirs in mid-eastern Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(4): 931~944.
- Zhang Chunlin, Xing Fengcun, Zhang Yueqiao, Jiang Fujie, Xu Wanglin, Zhang Amin. 2023&. Tectonic evolution of Qingyang and Wushenqi paleo-uplifts during the Early Paleozoic and its control on Cambrian lithofacies paleogeography in the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(1): 89~100.
- Zhang Chunlin, Yao Jingli, Li Chengshan, Xing Fengcun, Fan Liyong, Mo Wuling, Zhu Qiuying, Zeng Xu. 2021&. Characteristics of deep Cambrian carbonate reservoirs in the Ordos Basin and main control factors. *Oil & Gas Geology*, 42(3): 604~614.
- Zhang Juntao, Hu Wenxuan, Qian Yixiong, Wang Xiaolin, Cao Jian, Zhu Jingquan, Li Qing, Xie Xiaomin. 2009. Formation of saddle Dolomites in Upper Cambrian carbonates, western Tarim Basin (Northwest China): Implications for fault-related fluid flow. *Marine and Petroleum Geology*, 26(8): 1428~1440.
- Zhang Juntao, Zhang Yuyin, Gu Ning, Jin Xiaohui, Zhang Tao, Liu Sihong, Jia Huichong, Yang Jiaqi, Liu Ling, Gao Xiaopeng. 2023&. Unconformity characteristics of Huaiyuan movement in the northeast of Wushenqi paleo-uplift in Ordos Basin and its implications for Karst Reservoir generation. *Oil & Gas Geology*, 44(1): 101~109.
- Zhao Yanyan, Li Sanzhong, Li Da, Guo Lingli, Dai Liming, Tao Jianli. 2019&. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(1): 141~167.
- Zheng Haofu. 2015&. Study on reservoir characteristics of Zhangxia Formation and sanshanzi formation in the southeast of Ordos Basin. Supervisor: Chen Hongde. Chengdu; Chengdu University of Technology Master Thesis.
- Zhou Jingao, Fu Jinhua, Yu Zhou, Wu Dongxu, Ding Zhenchun, Li Weiling, Tang Jin. 2020&. Main types and formation mechanisms of marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 40(11): 20~30.
- Zhou Jingao, Xi Shengli, Deng Hongying, Yu Zhou, Liu Xinshe, Ding Zhenchun, Li Weiling, Tang Jin. 2020&. Tectonic—lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian - Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 40(2): 41~53.
- Zhu Dongya, Liu Quanyou, Zhang Juntao, Ding Qian, He Zhiliang, Zhang Xuefeng. 2019. Types of fluid alteration and developing mechanism of deep marine carbonate reservoirs. *Geofluids*, 2019: 3630915.

Characteristics and main controlling factors of the Cambrian Zhangxia Formation reservoir in southern Ordos Basin

ZHANG Juntao^{1, 2, 3)}, LI Song³⁾, JIN Xiaohui³⁾, ZHOU Yang³⁾,
ZHANG Tao³⁾, MA Qiang³⁾, YANG Jiaqi³⁾

1) State Energy Key Laboratory of Carbonate Oil and Gas, Beijing, 102206;

2) Sinopec Key Laboratory of Deep Geology and Resources, Beijing, 102206;

3) Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec, Beijing, 102206

Objectives: The oolitic beaches are widely distributed in the southern Ordos Basin during the Cambrian Zhangxia Formation sedimentary period. However, controlling factors of reservoir are not known, only industrial gas flow have seen in a few wells. The reservoir of the Zhangxia Formations is not a relatively simple beach reservoir, and the degree of reservoir development may be controlled by other factors.

Methods: In this paper, the analysis of petrography and geochemistry of new drilling wells and field profiles are utilized to dissect the developmental characteristics of the Zhangxia Formation reservoirs, and then reveal the main controlling factors of the Zhangxia Formation reservoirs.

Results: ① The reservoir rocks of the Zhangxia Formation are mainly (residual) oolitic—grainstone dolostone and fine—medium crystallined dolostone, and there are vug, fractures, and enlarged dissolution pores and intergranular pores in the reservoir space. ② The thickness of dolostone of the Zhangxia Formation varies greatly in the southern Ordos Basin, showing the characteristics of “more in the upper section, less in the lower section, more in the south, less in the north”. The dolostone has coarser, relatively authomorphic crystals, carbon, oxygen and strontium isotope values similar to those of seawater, similar rare earth element distribution patterns with seawater, and high strontium content; the fracture-filled dolomite has a saddle structure, with slight Eu anomalies. Dolomitization occurred mainly in the shallow burial period, and the dolomitization fluid is mainly seawater.

Conclusions: The Zhangxia Formation in the periphery of the Zhenyuan paleouplift in the southern part of the Ordos Basin is strongly influenced by the karst of the Huaiyuan Movement and the Caledonian Movement—Hercynian Movement. Far away from the Zhenyuan paleo-uplift area, the reservoirs are mainly influenced by the fracture activities of the Huaiyuan Movement.

Keywords: oolitic; dolomite; dolostone; fracture; Zhangxia Formations; the southern Ordos Basin

Acknowledgements: This paper is supported by the National Natural Science Foundation of China “Study on the Formation Mechanism of High Quality Dolostone Reservoir by Microbe-Gypsum—Temperature Co-evolution” (No. 42072177)

First author: ZHANG Juntao, male, born in 1981, professor, is mainly engaged in the research of carbonate reservoir; Email: zhangjt.syky@sinopec.com.cn

Manuscript received on: 2024-02-07; Accepted on: 2024-06-28; Published online on: 2024-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.041

Edited by: LIU Zhiqiang