

文章编号: 1671-1505(2026)03-1172-11 DOI:10.7605/gdxb.2026.083

运城盆地中上寒武统岩溶热储特征及发育模式*

李 丹¹ 班舒悦^{2,3} 鲍志东^{2,3} 王延欣¹ 孙少川¹ 宿宇驰^{2,3}
张辛雨^{2,3} 郑乃熙^{2,3} 郭妍晶^{2,3} 胡小龙^{2,3} 孙润明^{2,3}

1 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

摘 要 碳酸盐岩岩溶热储因其高孔渗性和巨大开发潜力, 正成为地热地质研究的重点领域。运城盆地中上寒武统碳酸盐岩厚度大、岩溶发育强, 是研究深部岩溶热储形成机制与有利区预测的重要对象。前人虽开展了寒武系的沉积、成岩及储集层特征研究, 但对多期构造—岩溶叠加背景下热储形成机制及其控制因素仍认识不足。本研究充分利用野外露头、二维地震、岩心、测录井及铸体薄片等资料, 结合区域构造演化与古地貌恢复, 对运城盆地中上寒武统的岩石学特征、储集层特征、成岩作用、岩溶类型及期次进行了系统研究, 建立了中上寒武统岩溶热储的发育模式。结果表明: (1) 运城盆地中上寒武统主要岩性包括鲕粒灰岩、生屑灰岩、叠层石灰岩、泥质灰岩及粉晶—细晶白云岩, 储集空间以选择性溶蚀孔、层控溶蚀带及构造裂缝为主; (2) 研究区发育 3 类岩溶作用, 受多期构造抬升控制, 可划分为 5 个主要期次, 各期岩溶作用叠置改造显著, 其中怀远期、加里东晚期及燕山期形成的大型暴露面是区域表生溶蚀的关键; (3) 本层岩溶热储由同生—准同生溶蚀奠定初始孔隙基础, 经 3 期表生岩溶叠置扩容, 并在断裂控制下深部埋藏溶蚀持续改造, 最终形成高孔隙度、高连通性的复合岩溶热储体系。本研究明确了运城盆地多期岩溶及构造演化控制下的热储形成机制, 为碳酸盐岩热储的预测与评价提供了理论依据, 并为华北地区及类似断陷盆地的地热资源勘查提供重要参考, 对提高中深层地热能开发效率具有实际地质意义。

关键词 岩溶热储 成岩作用 表生溶蚀 中上寒武统 运城盆地

第一作者简介 李丹, 女, 1994 年生, 工程师, 中国石化集团新星石油有限责任公司, 主要从事地热地质研究。E-mail: lid9194.xsy@sinopec.com。班舒悦, 女, 1997 年生, 中国石油大学(北京), 主要从事碳酸盐沉积和储集层研究。E-mail: lillianknow@gmail.com。

通讯作者简介 鲍志东, 男, 1964 年生, 教授, 主要从事沉积学与岩相古地理、储层地质与油藏描述研究。E-mail: baozhd@cup.edu.cn。

中图分类号: P588.24⁺5 文献标志码: A

Reservoir characteristics and development model of the Middle–Upper Cambrian karst geothermal system in Yuncheng Basin

* 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项项目(编号: 2024ZD1003600)、中国石油化工集团有限公司科技项目《运城盆地地热资源潜力与选区评价》(编号: KLJP24029)和中国石油化工股份有限公司重点科技项目(编号: p25075)联合资助。[Co-funded by the Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration-National Science and Technology Major Project(No. 2024ZD1003600), the Science and Technology Project of Sinopec “Assessment of Geothermal Resource Potential and Delineation of Favorable Explorable Areas in the Yuncheng Basin” (No. KLJP24029), and the Key Science and Technology Project of China Petroleum & Chemical Corporation (No. p25075)]

收稿日期: 2025-12-10 改回日期: 2026-01-09

LI Dan¹ BAN Shuyue^{2,3} BAO Zhidong^{2,3} WANG Yanxin¹ SUN Shaochuan¹ SU Yuchi^{2,3}
ZHANG Xinyu^{2,3} ZHENG Naixi^{2,3} GUO Yanjing^{2,3} HU Xiaolong^{2,3} SUN Runming^{2,3}

1 *Sinopec Star Petroleum Co. Ltd., Beijing 100083, China*

2 *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

3 *State Key Laboratory of Deep Geothermal Resources, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

Abstract Karstified carbonate geothermal reservoirs, characterized by high porosity-permeability and substantial development potential, represent a key target in deep geothermal exploration. The thick and strongly karstified Middle–Upper Cambrian carbonates of the Yuncheng Basin provide an ideal setting for investigating the genesis of deep karst reservoirs; however, the controlling mechanisms of reservoir development under multiphase tectonic-karst overprinting remain insufficiently constrained. In this study, outcrop observations, seismic data, cores, wireline logs, and casting thin sections, integrated with regional tectonic evolution and paleogeomorphic reconstruction, are used to systematically investigate lithologic and reservoir characteristics, diagenetic processes, karst types, and karstification stages of the Middle–Upper Cambrian carbonate succession. The results indicate that: (1) dominant lithologies include oolitic limestone, bioclastic limestone, stromatolitic and argillaceous limestone, and micro-to fine-crystalline dolostone, with reservoir space mainly comprising selective dissolution pores, bedding-parallel dissolution belts, and structural fractures; (2) three genetic categories of karstification and five major evolutionary stages are recognized, controlled by multiphase tectonic uplift, among which large exposure surfaces formed during the Huaiyuan, Late Caledonian, and Yanshanian events served as key loci for epigenetic karstification; (3) the karst reservoir initiated by syndimentary to early diagenetic dissolution, significantly enlarged through three phases of superimposed epigenetic karstification, and was further modified by fracture-controlled burial dissolution, ultimately forming a composite system characterized by high porosity and strong connectivity. These results clarify the formation mechanisms of the Middle–Upper Cambrian karst geothermal reservoir in the Yuncheng Basin under multiphase karstification and tectonic evolution, and provide a robust theoretical basis for the prediction and evaluation of carbonate geothermal system. The findings also have important implications for geothermal exploration in North China and in analogous fault-depression basins.

Key words karst geothermal reservoir, diagenesis, epigenetic dissolution, Middle–Upper Cambrian, Yuncheng Basin

About the first authors LI Dan, born in 1994, is an engineer of Sinopec Star Petroleum Co., Ltd., China. She is mainly engaged in geothermal geology research. E-mail: lid9194.xxsy@sinopec.com. BAN Shuyue, born in 1997, China University of Petroleum(Beijing). She is mainly engaged in carbonate sedimentology and reservoir geology. E-mail: lillianknow@gmail.com.

About the corresponding author BAO Zhidong, born in 1964, is a professor. He is mainly engaged in research on sedimentology and lithofacies palaeogeography, reservoir geology and reservoir description. E-mail: baozhd@cup.edu.cn.

随着全球能源体系加速向低碳化与可再生化转型，地热资源因其清洁、稳定与可再生等特性，正逐渐成为可持续能源体系的重要组成部分。相较于浅层地热能，中深层碳酸盐岩岩溶热储具有高孔渗

性、储量大、适宜大规模开采的优势，近年来逐渐成为地热地质学与储层地质学的重要研究方向。中国华北地区碳酸盐岩广泛分布，岩溶热储资源潜力巨大，目前，国内研究主要集中于奥陶系（鲁西

隆起区)及蓟县系雾迷山组(雄安新区)等层位(季汉成等, 2016; 鲁锴等, 2019; 曹瑛倬等, 2021; 郭瑞婧等, 2023), 而针对寒武系岩溶热储的系统研究相对薄弱。

运城盆地位于华北克拉通西南部。该区寒武系碳酸盐岩厚度大、分布广, 受断裂构造与岩溶作用的共同影响, 形成了典型的岩溶热储系统。近年来的地热钻井揭示, 部分位于中上寒武统碳酸盐岩层内的井, 热储温度可达 50~60℃, 地温梯度高且出水量稳定, 表明该层系具备良好的地热开发潜力(姚文兵, 2013; 王晓军, 2014; 张海永, 2016; 韩颖等, 2018; 李壮, 2023; Wu *et al.*, 2025)。然而, 受制于构造活动频繁及岩溶系统发育的复杂性, 目前对运城盆地岩溶热储的空间展布、储集层结构及主控因素等关键问题仍缺乏系统性认识, 制约了地热资源的精细评价与高效开发。

以运城盆地中上寒武统岩溶热储为研究对象, 综合运用露头、地震、钻测井及薄片等资料, 分析其储集层特征与发育规律, 探讨岩性、成岩作用与构造演化对储集空间形成的控制机制, 并建立运城盆地岩溶热储发育模式。研究成果不仅可为区域地热资源勘查与评价提供科学依据, 也可为类似断陷盆地岩溶热储研究提供借鉴, 对落实国家“双碳”战略和推进清洁能源结构优化具有重要意义。

1 区域地质背景

运城盆地位于山西省南部(东经 110°15'~112°04', 北纬 34°35'~35°49'), 盆地面积约为 6000 km², 地处鄂尔多斯地块东南缘, 同时为山西裂谷系南段的重要组成部分。盆地北接峨眉台地, 南邻中条山, 西侧以黄河为界与渭河盆地相邻, 东部与晋中盆地相接。地形南北两侧抬升、中部断陷, 整体呈近 NE 向展布, 为典型的新生代断陷盆地。运城盆地边界受中条山北缘断裂及峨眉台地断裂控制, 可划分为峨眉台地及运城坳陷 2 大次级构造单元, 其中运城坳陷可进一步划分为栲栳塬断凸、永济凹陷、涑水河谷地堑、青龙河谷地堑、鸣条岗断凸和绛县断凹 6 个三级构造单元(图 1)(朱瑞静, 2022)。

从构造演化阶段来看, 运城盆地经历了稳定沉积阶段、构造改造阶段及断陷盆地发育阶段 3 个主要过程(图 2)。盆地地层由老至新依次为太古界涑

水群变质岩系、寒武系—奥陶系碳酸盐岩系、新生界古近系、新近系及第四系沉积(赵俊峰等, 2019; 朱瑞静, 2022)。始新世以来, 受喜山运动的影响, 区域应力场由挤压转为张性, 运城盆地经历多期伸展—走滑复合运动, 区域上发育多组 NE-SW 向断裂(孟令超, 2011; Peng *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020), 盆地形成深大断陷并发育厚层新生界沉积。

盆地基底由太古界片麻岩和混合岩构成。寒武纪, 研究区处于稳定的浅海克拉通环境, 沉积相自下而上经历陆缘碎屑岩相—碳酸盐岩台地相的演变。下寒武统辛集组—馒头组以灰黄色砂岩及紫红色泥岩为主, 为干旱浅海环境; 中寒武统张夏组以厚层颗粒灰岩及泥晶灰岩为特征, 指示开阔台地边缘沉积背景; 上寒武统三山子组以白云岩、白云质灰岩为主, 为局限台地沉积; 下奥陶统发育厚层白云岩, 与下伏寒武系共同构成运城盆地重要的碳酸盐岩热储集层。新生界主要为河湖相砂、粉砂岩及泥岩组成, 厚度可达 310~3000 m(曹冀龙, 2016; 金刚, 2020)。

寒武系—奥陶系碳酸盐岩为岩溶热储提供了优质的储集空间, 其上覆盖的新生代泥岩—砂岩地层构成了良好的隔热封盖层, 形成“下古生界储集层—新生界盖层”的稳定储盖组合。

2 中上寒武统热储特征

2.1 主要岩石类型

2.1.1 徐庄组

运城盆地徐庄组主要由紫红色—灰绿色灰质泥岩组成, 常呈薄层—中厚层状产出, 局部夹灰白色石灰岩。整体上地层自下而上泥质含量逐渐减少, 碳酸盐组分相对增加。徐庄组层理发育, 局部可见明显的成岩改造现象(图 2-a, 2-b, 2-c)。

盆地周缘典型剖面显示, 徐庄组下部以薄层紫红色灰质泥岩与灰绿色灰质泥岩互层为特征, 单层厚度一般为 10~30 cm, 发育水平层理及小型波状层理, 局部夹有灰白色石灰岩条带及团块。局部发育灰白色泥质灰岩与灰黄色灰质泥岩互层, 常见波状层理。徐庄组上部岩性变化较大, 常发育紫红色泥质灰岩中夹竹叶状砾屑灰岩以及灰白色砂屑灰岩和鲕粒灰岩等, 水动力条件相对较强。

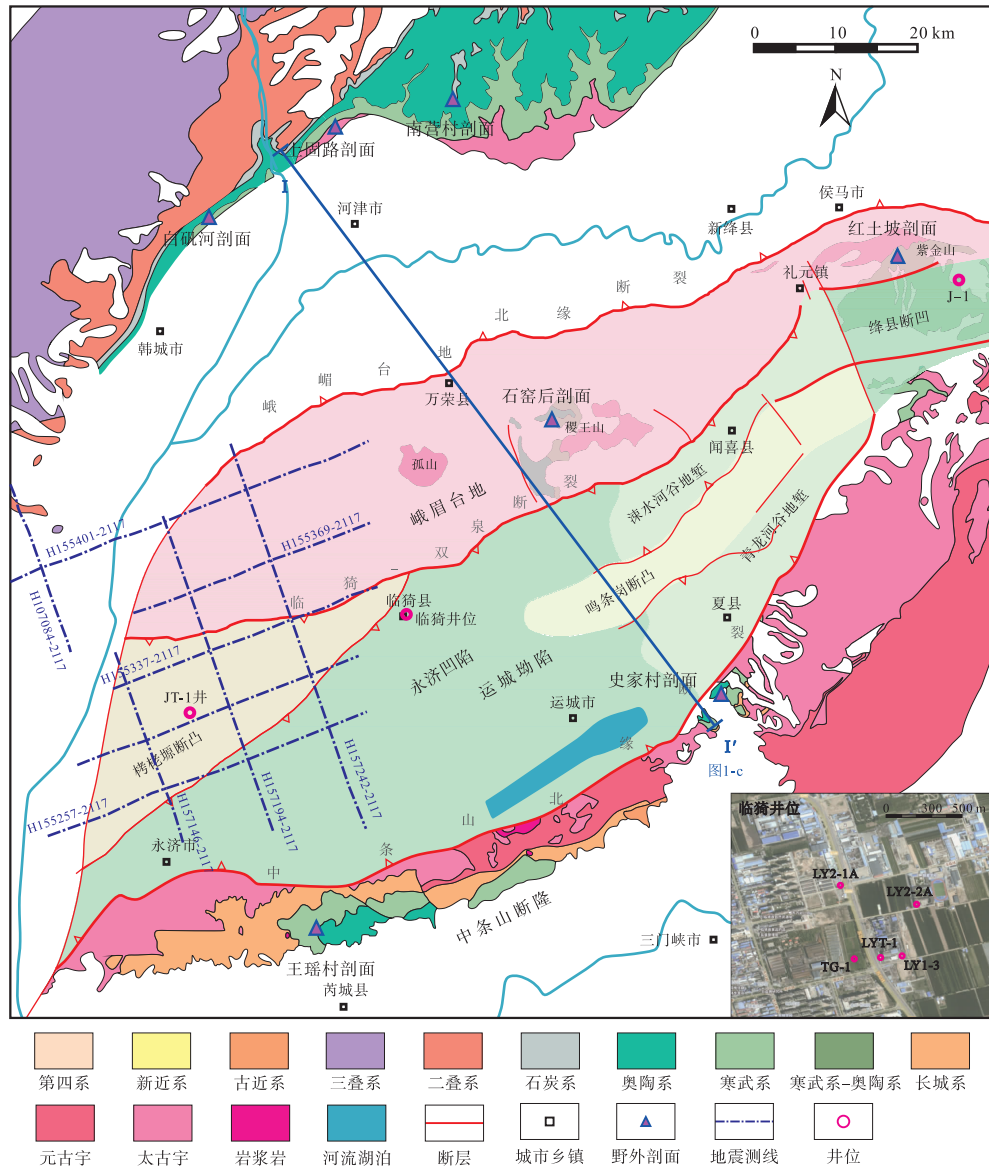


图 1 运城盆地构造单元划分及周缘地层展布

Fig. 1 Structural unit division of the Yuncheng Basin and distribution of surroundings strata

徐庄组岩石类型及组合指示其沉积环境在混合坪至颗粒滩体系间呈周期性波动，其沉积演化过程受区域性氧化还原条件变化及海平面波动的共同控制。

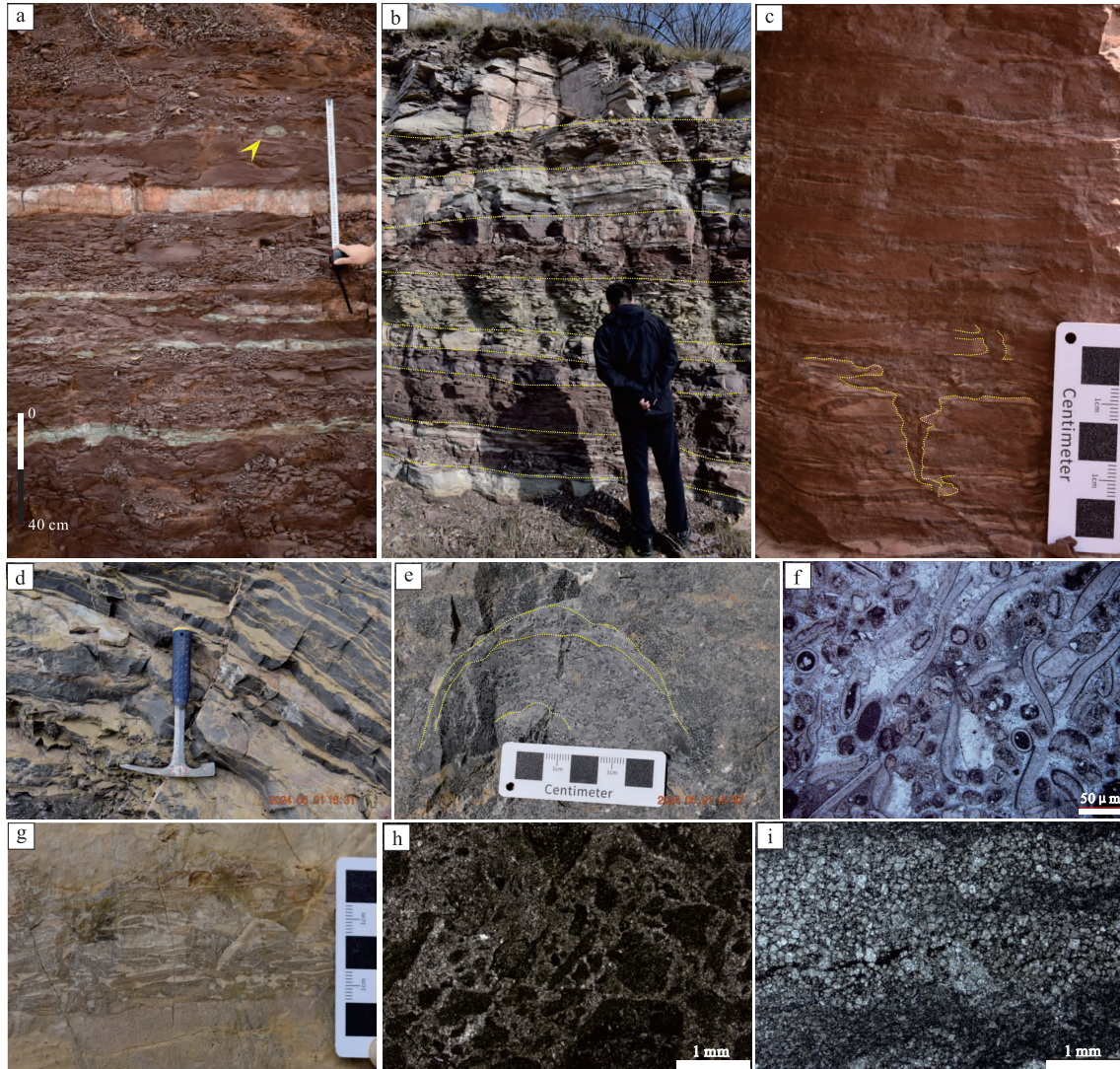
2.1.2 张夏组

运城盆地张夏组的岩性以灰色厚层至块状鲕粒灰岩为主，夹少量薄层泥晶灰岩，局部可见核形石灰岩、叠层石灰岩及少量泥岩（图 2-d, 2-e, 2-f）。该组整体沉积于碳酸盐岩台地边缘环境。

鲕粒灰岩是张夏组最典型的岩性类型，鲕粒粒径主要分布在 0.2~2.0 mm，局部发育巨鲕可达

30 mm，颗粒结构清晰，类型多样，其核心多为三叶虫碎片或石英颗粒，填隙物主要为泥晶方解石，局部岩层中发育三叶虫生屑鲕粒灰岩。岩石呈厚层至块状产出，可见大型交错层理，形成于浅水高能鲕粒滩环境。部分鲕粒灰岩遭受不同程度白云石化改造，但仍保留原始鲕粒结构。

生屑灰岩以三叶虫及棘皮类碎屑为主要组分，填隙物既有亮晶方解石，也有泥晶方解石（图 2-f），常见基底型或孔隙型胶结。核形石灰岩主要由不规则椭球状核形石组成，粒径为数毫米至数厘米，内部可见凝块状微构造，反映中等能量、



a—紫红色灰质泥岩夹灰色泥晶灰岩条带，南营村剖面，徐庄组；b—薄层紫红色灰质泥岩与泥晶灰岩、灰绿色灰质泥岩互层，红土坡剖面，徐庄组；c—紫红色泥质灰岩，发育泻水构造，红土坡剖面，徐庄组；d—泥晶灰岩夹泥质条带，王瑶村剖面，张夏组；e—叠层石夹鲕粒灰岩，王瑶村剖面，张夏组；f—生屑灰岩，单偏光，王瑶村剖面，张夏组；g—竹叶状白云岩，见氧化环边，南营村剖面，三山子组；h—岩溶角砾岩，单偏光，南营村剖面，三山子组；i—细晶白云岩，单偏光，南营村剖面，三山子组

图 2 运城盆地中上寒武统典型岩石类型

Fig. 2 Typical rock types of the Middle-Upper Cambrian in Yuncheng Basin

透光性较好的浅水环境。叠层石灰岩表现为波状或穹状层理，常与鲕粒灰岩互层(图 2-e)。泥晶灰岩层理发育，常夹泥质条带(图 2-d)，形成于低能、静水的台地内部环境。

2.1.3 三山子组

三山子组整合叠覆于张夏组之上，是寒武纪—奥陶纪过渡期的重要单元，其岩石类型和组合特征记录了海退—暴露背景下的沉积与成岩演化过程。三山子组主要发育灰黄色至深灰色竹叶状白云岩、晶粒白云岩与岩溶角砾岩。此外，还可见少量泥质

白云岩与灰质白云岩。地层多呈中厚层状产出，个别层段发育巨厚层。白云岩普遍具中—细晶结构，部分层位白云石化作用强烈，原始结构保存较少。三山子组重结晶作用明显，广泛发育溶蚀孔洞(图 2-g, 2-h, 2-i)。

竹叶状灰岩是三山子组最具代表性的岩性类型之一，常见于三山子组下段主要由竹叶状砾屑组成，砾屑长轴多为 1~4 cm，呈直立或倾斜定向排列，约 35% 的砾屑边缘发育紫红色氧化圈(图 2-g)。其形成与风暴作用相关，氧化晕圈代表大气

暴露期渗流带赤铁矿化作用。

晶粒白云岩广泛分布于三山子组中上部层段。岩石具中—细晶结构,晶体多呈自形至半自形,部分白云石发育雾心亮边结构,局部保留原始结构残余轮廓(图 2-i),表明三山子组上部经历了显著的白云石重结晶过程。

岩溶角砾岩主要分布于三山子组中上部,常与晶粒白云岩或竹叶状灰岩呈突变接触。其特征为棱角至次棱角状角砾(粒径 3~40 cm),充填物主要为泥质及灰质(图 2-h)。该岩石类型代表古岩溶塌陷充填产物,角砾间的铁锰质富集层标志区域性暴露不整合面,记录了区域性暴露事件与岩溶作用(Kerans, 1988)。

三山子组总体以白云岩类为主,竹叶状灰岩记录了风暴事件与短期暴露的沉积作用;晶粒白云岩体现了回流渗透作用控制下的多阶段白云石化过程;岩溶角砾岩则标志区域性暴露与古岩溶发育。该岩相组合揭示了海退背景下浅海台地向暴露潮坪的逐步演化过程。

2.2 储集空间类型及组合

运城盆地中上寒武统碳酸盐岩储集层的储集空间以次生孔隙和裂缝为主,原生孔隙在早期成岩阶段大多被胶结或重结晶作用封闭(图 3-a, 3-b)。研究层位最有利的储集空间类型为次生孔隙和构造缝—构造溶蚀缝(图 3-c 至 3-i)。通过对全区共 2 口典型井、7 条野外剖面、234 张薄片进行统计,次生孔隙体积约占总孔隙体积的 61.2%,构造缝—构造溶蚀缝约占 31.4%,其他类型孔隙约占 7.4%。

次生孔隙主要包括溶蚀孔洞。溶蚀孔部分具有选择性,沿特定颗粒内部或纹层发生,其展布常顺层面或裂缝方向延伸,可在层面内形成一定规模的薄层状孔隙发育带(图 3-d),局部可见半充填方解石或黏土矿物(图 3-c)。大型溶洞通常沿不整合接触界面、层间弱面或暴露期形成的淋滤带展布,溶洞直径可达数十厘米至米级,洞内可见塌陷角砾、风化黏土等残留物(图 3-f)。

裂缝在研究区内分布广泛,主要包括构造裂缝、构造溶蚀缝及压溶缝(图 3-g, 3-g, 3-i)。裂缝形态多样,呈线状、羽状或网状展布。研究区构造剪切缝最为发育,其规模大、延伸远,与区域应力场方向一致,常以高角度切穿研究层段。该类裂

缝以未充填裂缝最为常见,其次为全充填和半充填类型。裂缝充填物中以亮晶方解石最为普遍,其次为白云石、泥质组分及沥青质(图 3-h, 3-i)。构造溶蚀缝主要表现为沿构造缝及成岩缝的定向溶蚀扩展,易形成线状一条带状孔隙结构,并组合形成不规则网状裂隙体系。该类溶孔孔径变化大(0.5~30 mm),内部常半充填粗晶方解石或白云石,连通性相对较强。

总体来看,运城盆地中上寒武统碳酸盐岩储集层原生孔隙贡献极为有限。溶蚀孔洞提供了主要的有效孔隙体积,而裂缝系统显著改善了储集层的渗流能力。次生溶蚀孔的形成受岩性差异、层理结构及裂缝网络的共同控制。因此,储集空间的成因序列与形成期次是揭示储集层演化机制的关键研究内容。

3 岩溶作用类型及主控因素

3.1 岩溶作用类型及特征

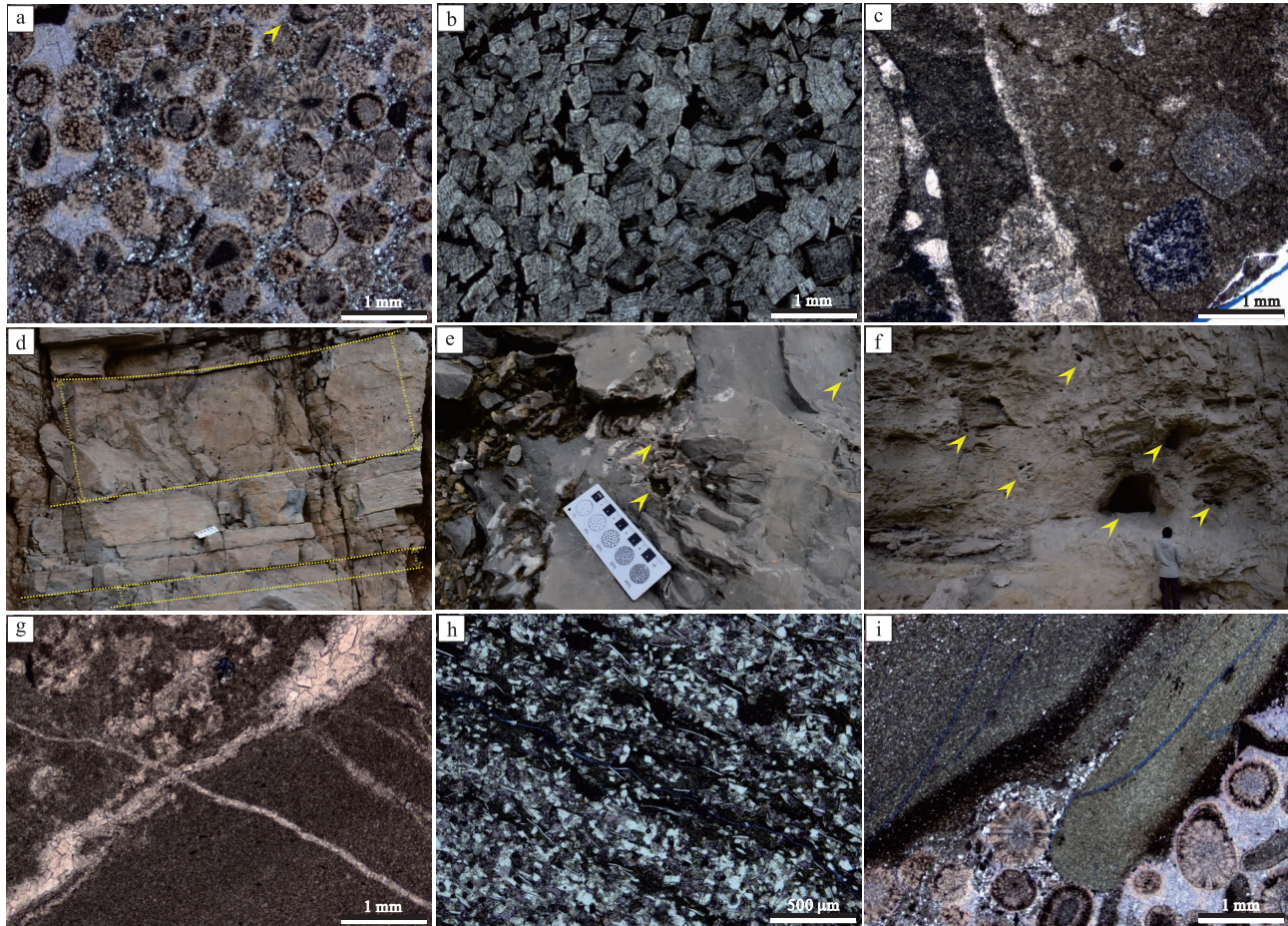
运城盆地中—上寒武统碳酸盐岩的岩溶作用经历了同生—准同生、表生及埋藏(张宝民和刘静江, 2009) 3 个主要阶段,其发育受海平面波动、构造抬升及流体演化等多种因素控制,呈现明显的阶段性、继承性与叠加特征。

3.1.1 同生—准同生岩溶作用

研究区同生—准同生岩溶作用主要发生于沉积—早成岩阶段,受沉积相、岩性成分、微生物作用及早期流体活动的共同控制,表现出显著的选择性和层控性(图 4-a, 4-b)。该阶段的溶蚀以弱酸性孔隙水和早期大气淡水的浸泡—淋滤为主(Bagni *et al.*, 2020)。

张夏组的鲕粒灰岩与叠层石灰岩中同生—准同生溶蚀具有显著的选择性特征。在鲕粒灰岩中溶蚀优先沿鲕粒核心部位发生,形成局部颗粒内或颗粒边缘的点状至不规则溶孔,直径 0.4~3.24 mm,在叠层石灰岩中,溶蚀常沿微生物层理分布,产生连续的小型条带状孔隙(图 4-b)。

在张夏组泥晶石灰岩及三山子组粉晶白云岩中,同生—准同生溶蚀主要沿层理面或薄层界面发生,溶蚀孔洞多呈细长或不规则形态,形成连续的层控溶蚀带及水平状条带型溶蚀体(图 4-a)。这些溶蚀带通常平行于沉积层面延伸,可达数十厘米至数米,显示明显的层控特征,反映出沉积后早期



a—鲕粒灰岩，颗粒间孔隙被亮晶方解石完全充填，徐庄组，红土坡剖面，单偏光；b—晶粒白云岩，晶间孔隙为泥质物全充填，三山子组，石窑后剖面，单偏光；c—砂屑灰岩，颗粒内部发育选择性溶蚀孔，张夏组，王瑶村剖面，单偏光；d—泥晶白云岩，沿层理发育顺层溶蚀孔，三山子组，南营村剖面；e—亮晶白云岩，发育不规则溶蚀孔洞且方解石半充填，三山子组，石窑后剖面；f—大型溶蚀孔与溶洞，三山子组顶部，南营村剖面；g—泥晶灰岩，“X”型构造裂缝被亮晶方解石完全充填，三山子组，南营村剖面，单偏光；h—长英质灰岩，发育未充填裂缝，徐庄组，红土坡剖面，单偏光；i—含鲕粒长英质灰岩，裂缝发育且未充填，徐庄组，红土坡剖面，单偏光

图 3 运城盆地上寒武统主要储集空间类型

Fig. 3 Reservoir space types of the Upper Cambrian carbonate system in Yuncheng Basin

的渗滤流体优先沿层间薄弱带迁移，使其成为最早的溶蚀通道。

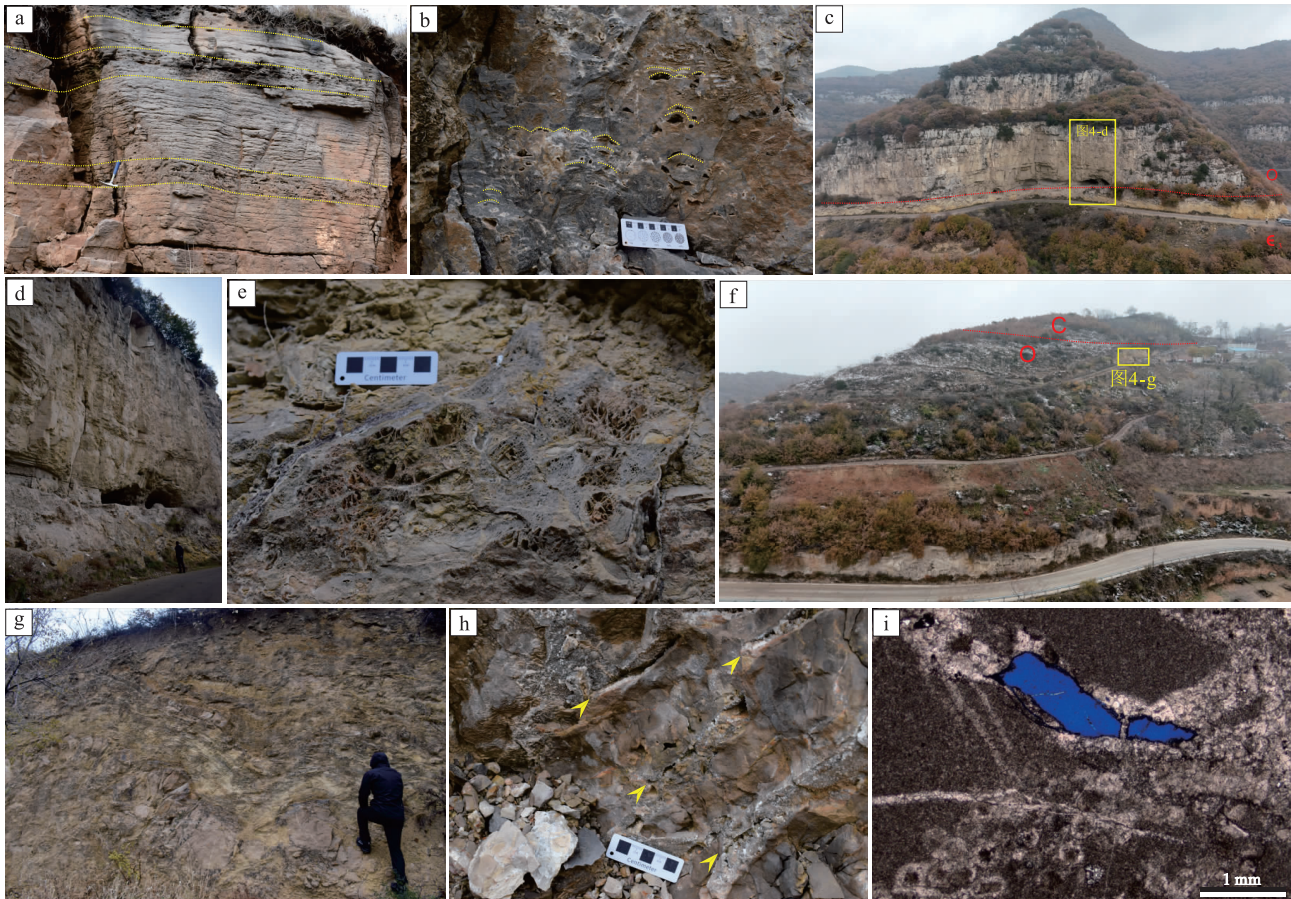
3.1.2 表生岩溶作用

运城盆地中上寒武统碳酸盐岩经历了多期构造抬升及大规模暴露，形成发育程度高、分布广泛的表生岩溶体系。表生岩溶溶蚀规模大、孔洞形态多样、延展性强，主要沿寒武系顶部及奥陶系顶部的区域性不整合面展开（图 4-c, 4-f, 4-g）。

在寒武系—奥陶系不整合面附近发育连续的表生溶蚀层、溶沟与大型溶洞群（图 4-c, 4-d）。单个溶洞的洞径一般为 0.5~2 m，部分可达数米级，洞内常见垮塌角砾堆积。溶洞壁面发育不规则溶蚀凹坑、穹状扩张构造及密集蜂窝状蚀孔（孔

径 1~5 cm），呈现典型的大气淡水侵蚀特征（图 4-e）。区域尺度上，不整合面连续性良好，其顶部发育多个数米至数十米宽的溶蚀洼地与溶洼群，风化壳厚度一般为 2~4.3 m。

在奥陶系—石炭系不整合面附近，白云岩风化壳厚度普遍大于 3 m，淋滤层界面清晰，并可见垂向溶蚀槽（图 4-f, 4-g）。不整合面上下数米范围内，溶蚀结构常沿层理面与裂隙密集叠置，形成多级表生溶孔组合。白云岩中的表生岩溶以非选择性的密集溶蚀孔网络为主，孔洞直径一般 0.5~3 cm，局部可连通成 10 cm 以上的团簇状溶孔，孔壁可见钙化边缘。部分剖面可见岩溶角砾岩。



a—粉晶白云岩，沿层理发育连续的层控溶蚀带，三山子组，王瑶村剖面；b—叠层石灰岩，顺层叠层石层面发育选择性溶孔，张夏组，王瑶村剖面；c—寒武系—奥陶系不整合面（怀远期构造抬升）及其控制下的表生岩溶带组合；d—不整合面附近发育的大型表生溶洞，洞底可见垮塌角砾堆积；e—白云岩中网状溶蚀孔，孔壁具明显钙化边缘；f—奥陶系—石炭系不整合界面（加里东晚期构造抬升）及其控制下的表生岩溶带组合；g—黄褐色白云岩风化壳；h—沿构造裂缝发育的溶蚀扩大孔洞，方解石充填一半充填，三山子组，石窑后剖面；i—顺裂缝发育溶孔，方解石及沥青质半充填，张夏组，上固路剖面，单偏光

图 4 运城盆地中上寒武统碳酸盐岩溶作用特征

Fig. 4 Karst features of the Middle–Upper Cambrian carbonates in Yuncheng Basin

3.1.3 埋藏岩溶作用

埋藏岩溶作用主要发育于中—深埋藏阶段，主要表现为沿构造裂缝、成岩缝及颗粒间薄弱结构的定向溶蚀扩展，同时常伴随热液活动指示（Valencia and Laya, 2020）。

溶蚀常沿早期裂缝形成线状或带状扩大孔洞，裂缝壁面呈现不规则侵蚀状刻蚀，孔洞形态受裂缝几何形态控制（图 4-b）。部分裂缝交汇区可见较大的不规则溶蚀腔体与裂隙网络相连。溶蚀孔洞内部多见亮晶方解石、白云石及沥青质的部分充填（图 4-i）。深部裂缝中常见 2 期以上碳酸盐矿物和有机质的叠置充填结构，显示分期热液充填特征。

与同生—准同生岩溶及表生岩溶相比，埋藏岩

溶的几何形态更依赖于先存储集空间及裂缝网络，孔洞充填物组合更为复杂，呈现出深埋环境下典型的“扩容—多期充填”构型。

3.2 岩溶作用期次及主控因素

运城盆地中上寒武统碳酸盐岩的岩溶作用具有显著的多期叠加特征，其形成过程与区域构造抬升、不整合面发育及裂缝体系演化密切相关。研究区受怀远期、加里东运动晚期、燕山期与喜山期构造事件控制，本次研究以构造运动为纲，将运城盆地中上寒武统的岩溶作用划分为 5 个主要期次。

第 I 期古岩溶发生于中晚寒武世沉积与早成岩阶段，主要为同生—准同生溶蚀（图 4-a, 4-b）。该期岩溶规模较小，局限于鲕粒灰岩、叠层石灰岩

及粉晶白云岩等敏感岩相内部,呈层控或颗粒选择性特征,受同生—准同生期海平面波动、沉积微环境化学特征与早期孔隙水性控制。该期为后续溶蚀提供了初始孔隙基础。

第Ⅱ期古岩溶对应怀远运动构造抬升,形成寒武系—奥陶系不整合面(图 4-c 至 4-g),主要发育表生岩溶作用,大气降水沿暴露面渗入,在古地貌高点及斜坡地带形成连续的表生岩溶带。该期岩溶在运城盆地内分布广泛,并对其下伏地层形成一套广泛的表生溶蚀体系。怀远期后进入了短暂的浅埋藏阶段,沉积了部分奥陶系碳酸盐岩。

第Ⅲ期古岩溶对应加里东运动晚期抬升事件,形成奥陶系—石炭系不整合面(图 4-h, 4-i),该阶段的岩溶作用在垂向上切割更深,形成多级叠置的表生溶蚀带,并对早期溶蚀结构进行加深、扩大或重新活化,形成复合式表生岩溶系统。

第Ⅳ期古岩溶作用与燕山期构造抬升密切相关。该阶段运城盆地整体强烈抬升并经历广泛剥蚀,寒武系—奥陶系原有岩溶体系再次遭受表生改造,形成新一轮暴露—淋滤—溶蚀序列。由于构造抬升幅度大、剥蚀作用强,造成上奥陶统至白垩系普遍缺失,甚至部分地区与第Ⅱ、Ⅲ期表生岩溶体系重合,尤其是在盆地西部 JT-1 井周缘剥蚀显著,剥蚀至张夏组顶部。盆地南部自古近纪开始重新接受沉积,而北部位于构造高点,持续暴露时间更长,直至新近纪晚期才重新进入沉积阶段。长期暴露使前地表生岩溶面在空间上进一步扩展,并叠加形成多级复合岩溶界面(图 5)。

第Ⅴ期古岩溶作用发生于喜山运动阶段,该时

期主要发育埋藏岩溶作用。此时研究区进入断陷盆地发育阶段,多组 NE-SW 向正断层的发育造成盆地南部埋深显著加大,而北部峨眉台地及其周缘保持构造高地势,进一步遭受持续溶蚀。受断裂系统高度发育的影响,深部流体沿断层进行导流与交汇,沿构造裂缝与成岩缝的定向溶蚀与扩大,形成线状或腔状的深部溶蚀体,有效沟通前期形成的溶蚀孔隙,使其不断扩大与连通,形成规模更大的埋藏岩溶体系。此外,峨眉台地孤山岩体及周缘发育明显的岩浆活动(闫纪元, 2021),岩浆沿断裂运移产生热液流体,进一步加强溶蚀并形成热液充填。

4 岩溶热储发育模式

运城盆地中上寒武统碳酸盐岩岩溶热储的形成是沉积背景、成岩演化、古地貌分异与多期构造—流体活动长期耦合的结果。综合沉积—成岩—构造—岩溶全过程,可建立研究区岩溶热储发育模式(图 6)。

中—晚寒武世,研究区处于开阔台地颗粒滩—风暴滩—局限台地碳酸盐沉积体内,地势整体平缓。在准同生岩溶作用,在张夏组鲕粒滩体、叠层石灰岩及三山子组粉晶白云岩中形成微孔、晶间孔与薄层状溶蚀带,为储集层提供了早期孔隙基础(图 6-a)。晚寒武世怀远运动导致了寒武系首次广泛暴露,形成区域性不整合面。盆地中部溶蚀最强,但受强剥蚀及塌陷角砾充填影响,有效孔隙度有限;周缘斜坡带则在稳定的水平潜流作用下持续扩溶,并连通前期的溶蚀孔洞,初步建立了热储体

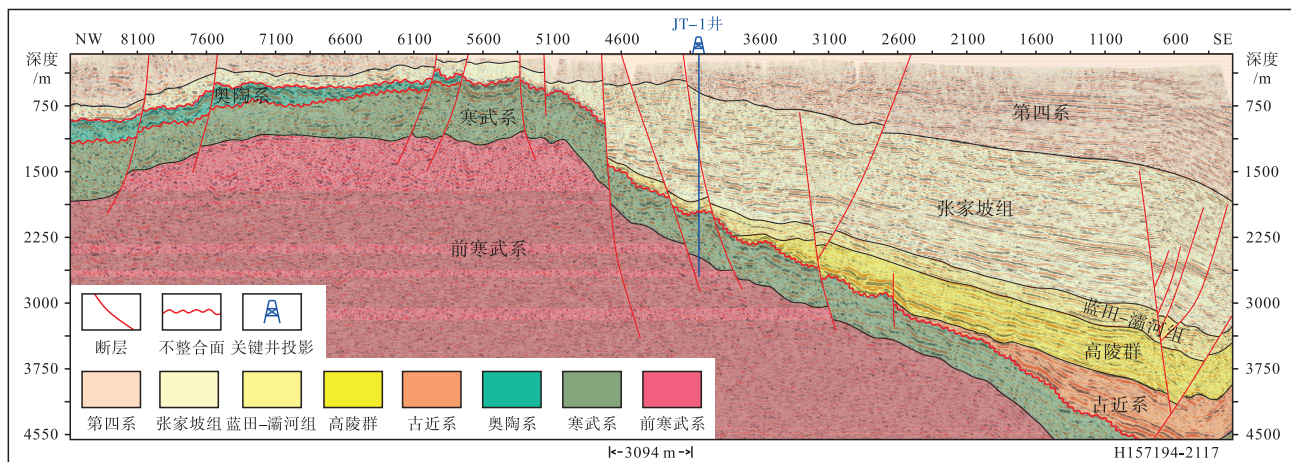


图 5 运城盆地中上寒武统区域性不整合面的空间展布

Fig. 5 Spatial distribution of regional unconformity in the Middle–Upper Cambrian in Yuncheng Basin

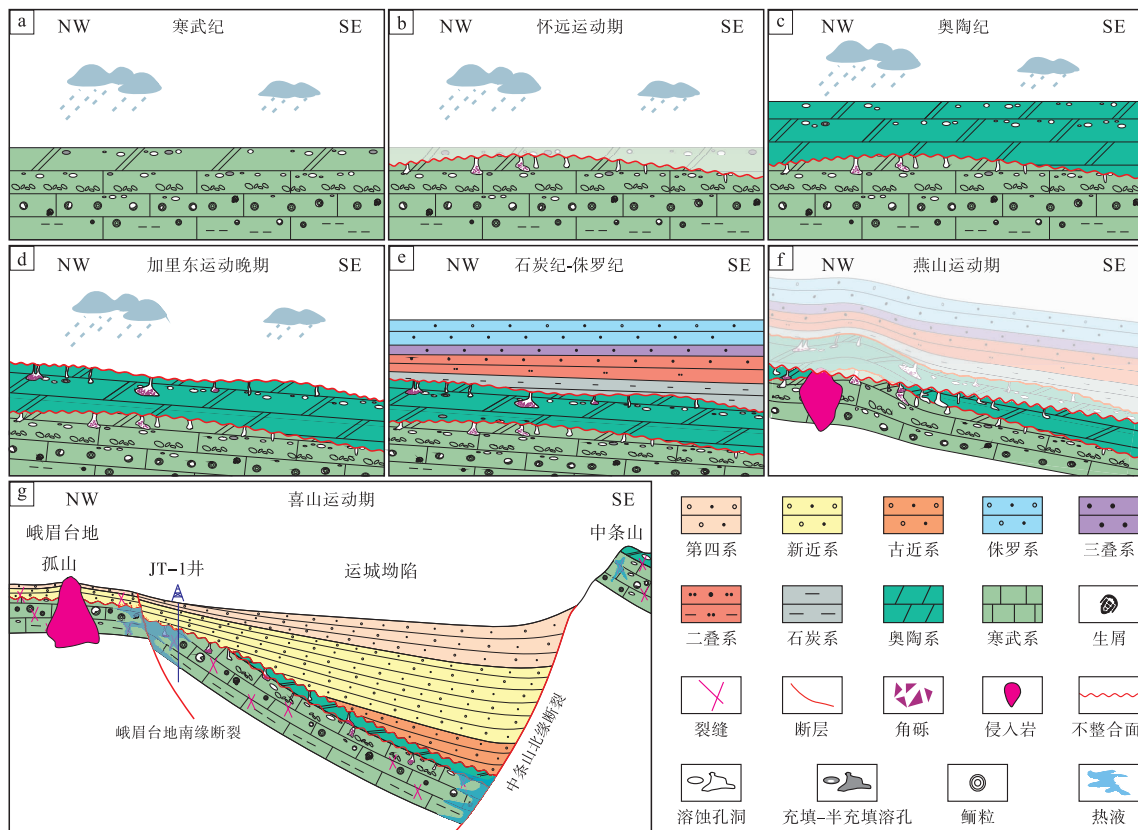


图 6 运城盆地中上寒武统岩溶热储发育模式

Fig. 6 Genetic model for development of the Middle–Upper Cambrian karst geothermal reservoirs in Yuncheng Basin

系的高渗通道和溶洞网络(图 6-b)。加里东运动晚期的再度抬升使奥陶系顶部暴露,前期溶蚀面被重新激活,形成叠置式表生岩溶。新生溶洞与早期孔隙连通,构建了具有明显垂向渗透性的复合岩溶系统(图 6-d)。燕山运动晚期强烈剥蚀,石炭系至白垩系地层普遍缺失,孤山岩体入侵并提供热液流体,进一步加强溶蚀(图 6-f)。喜山期构造活动使运城盆地进入断陷阶段,北东—南西向正断层体系发育,裂缝不仅提供储集空间,还连通多期岩溶孔洞,形成深部断裂—溶洞复合导流体系,并在断层附近(图 6-g)。

总体而言,运城盆地中上寒武统岩溶热储经历了由早期同生—准同生溶蚀奠定孔隙基础、3期表生岩溶构建主体空间、断裂活动实现多期岩溶连通、深部埋藏溶蚀塑造最终储集层形态的过程。最终演化为复合型的多层次岩溶热储结构。

5 结论

1) 运城盆地中上寒武统碳酸盐岩以鲕粒灰

岩、生屑灰岩、叠层石灰岩、粉晶—细晶白云岩及颗粒白云岩为主,具有明显的沉积—成岩非均质性。储集空间主要为次生孔隙和构造裂缝,包括选择性溶蚀孔、层控溶蚀孔、裂缝型溶蚀孔等多级溶洞,发育孔—缝复合结构。

2) 研究区岩溶作用具有显著的多期叠加特征,其形成过程基本受控于怀远期、加里东晚期、燕山期和喜山期构造演化。岩溶作用可分为 5 期: I 期同生—准同生溶蚀奠定微尺度孔隙基础; II 期怀远期暴露形成寒武系—奥陶系大型表生岩溶面; III 期加里东晚期形成奥陶系顶部不整合面; IV 期燕山期强烈抬升导致石炭系至白垩系大规模缺失,早期岩溶系统重新活化并叠加; V 期喜山期深大断裂导通热液,促成深部埋藏溶蚀发展。多期岩溶的继承、叠置和重新激活共同塑造了复杂的三维岩溶网络。

参考文献 (References)

曹冀龙. 2016. 临汾—运城盆地上古生界沉积演化及资源潜力分析. 西北大学硕士学位论文: 30–51. [Cao J L. 2016. Sedimentary evolution and resource potential of Upper Paleozoic, Linfen–Yuncheng

- Basin. Masteral dissertation of Northwest University: 30-51]
- 曹瑛倬, 鲍志东, 鲁锴, 徐世琦, 王贵玲, 袁淑琴, 季汉成. 2021. 冀中坳陷雄县地热田主控因素及成因模式. 沉积学报, 39(4): 863-872. [Cao Y Z, Bao Z D, Lu K, Xu S Q, Wang G L, Yuan S Q, Ji H C. 2021. Genetic model and main controlling factors of the Xiongqian geothermal field. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(4): 863-872]
- 郭瑞婧, 纪友亮, 马铮涛, 万宏峰, 杨栋吉, 季汉成, 鲍志东, 周勇, 房超, 鲁锴, 刘金侠. 2023. 雄安新区雾迷山组岩溶热储成储机制及发育模式. 古地理学报, 25(1): 180-197. [Guo R J, Ji Y L, Ma Z T, Wan H F, Yang D J, Ji H C, Bao Z D, Zhou Y, Fang C, Lu K, Liu J X. 2023. Mechanism and development model of karst reservoir in the Wumishan Formation in Xiong'an New Area. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(1): 180-197]
- 韩颖, 白雪峰, 张欣. 2018. 山西省地热资源及其开发利用模式探讨. 中国地质调查, 5(5): 13-20. [Han Y, Bai X F, Zhang X. 2018. Discussion on geothermal resources and its exploitation and utilization model in Shanxi Province. *Geological Survey of China*, 5(5): 13-20]
- 季汉成, 房超, 华南, 肖菁, 李海泉, 黎雪, 李晨, 马鹏鹏, 毛翔. 2016. 鲁西豫东地区奥陶系顶部岩溶储集层特征及有利控制因素. 古地理学报, 18(4): 545-559. [Ji H C, Fang C, Hua N, Xiao J, Li H Q, Li X, Li C, Ma P P, Mao X. 2016. Characteristics and favorable controlling factors of karst reservoirs within the uppermost part of Ordovician in western Shandong-eastern Henan area. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(4): 545-559]
- 金刚. 2020. 山西运城盆地新生代沉积-构造演化研究. 长安大学硕士学位论文: 1-34. [Jin G. 2020. Study on Cenozoic sedimentary-structural evolution of Yuncheng Basin, Shanxi. Masteral dissertation of Chang'an University: 1-34]
- 李壮. 2023. 山西省地地质背景研究及成因分析. 太原理工大学硕士学位论文: 12-36. [Li Z. 2023. Background research and genesis analysis of geothermal geology in Shanxi Province. Masteral dissertation of Taiyuan University of Technology: 12-36]
- 鲁锴, 鲍志东, 季汉成, 刘金侠, 王贵玲, 马峰, 郭瑞婧, 曹瑛倬, 杨飞, 符勇, 李潇博, 华盈鑫, 阙宜娟, 李宗峰, 许西挺, 胡先才. 2019. 雄安新区蓟县系雾迷山组岩溶热储特征、主控因素及有利区预测. 古地理学报, 21(6): 885-900. [Lu K, Bao Z D, Ji H C, Liu J X, Wang G L, Ma F, Guo R J, Cao Y Z, Yang F, Fu Y, Li X B, Hua Y X, Que Y J, Li Z F, Xu X T, Hu X C. 2019. Characteristics, main controlling factors and favorable area prediction of karstic geothermal reservoirs of the Jixianian Wumishan Formation in Xiong'an New Area. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(6): 885-900]
- 孟令超. 2011. 山西断陷盆地地裂缝成因机理研究. 长安大学博士学位论文: 1-74. [Meng L C. 2011. Study on the formation mechanism of ground fissures in Shanxi Fault Basin. Doctoral dissertation of Chang'an University: 1-74]
- 王晓军. 2014. 浅析山西省地热资源主要控热构造及地热赋存规律. 华北国土资源, (2): 85-87. [Wang X J. 2014. Major thermo-controlling structures and geothermal occurrence patterns in Shanxi Province. *Huabei Land and Resources*, (2): 85-87]
- 闫纪元. 2021. 运城盆地及北侧孤山晚新生代构造-沉积与隆升-剥蚀过程研究. 中国地质科学院博士学位论文: 36-95. [Yan J Y. 2021. Late Cenozoic tectonic-sedimentary, uplifting and denudational process of the Yuncheng Basin and Northern Gushan Mountain. Doctoral dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences: 36-95]
- 姚文兵. 2013. 山西运城盆地地热水成因分析. 山西建筑, 39(26): 94-95. [Yao W B. 2013. The formation analysis of geothermal water in Shanxi Yuncheng Basin. *Shanxi Architecture*, 39(26): 94-95]
- 张宝民, 刘静江. 2009. 中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题. 石油勘探与开发, 36(1): 12-29. [Zhang B M, Liu J J. 2009. Classification and characteristics of karst reservoirs in China and related theories. *Petroleum Exploration and Development*, 36(1): 12-29]
- 张海永. 2016. 山西沉积盆地地热资源分布及其特征. 华北国土资源, (6): 115-116. [Zhang H Y. 2016. Distribution and characteristics of sedimentary basin-type geothermal resources in Shanxi Province. *Huabei Land and Resources*, (6): 115-116]
- 赵俊峰, 盛双占, 王栋, 芦建军, 张建伍, 刘刚, 崔海栋. 2019. 临汾—运城盆地上古生界演化、改造及油气资源潜力分析. 地质论评, 65(1): 168-180. [Zhao J F, Sheng S Z, Wang D, Lu J J, Zhang J W, Liu G, Cui H D. 2019. Analysis on evolution, modification and hydrocarbon resources potential of the Upper Paleozoic in the Linfen-Yuncheng Basin. *Geological Review*, 65(1): 168-180]
- 朱瑞静. 2022. 运城盆地油气地质与成藏条件研究. 长安大学博士学位论文: 1-67. [Zhu R J. 2022. Study on petroleum geology and accumulation conditions in Yuncheng Basin. Doctoral dissertation of Chang'an University: 1-67]
- Bagni F L, Bezerra F H C, Balsamo F, Maia R P, Dall'Aglio M. 2020. Karst dissolution along fracture corridors in an anticline Hinge, Jandaíra Formation, Brazil: implications for reservoir quality. *Marine and Petroleum Geology*, 115: 104249.
- Kerans C. 1988. Karst-controlled reservoir heterogeneity in the Ellenburger Group of West Texas. *AAPG Bulletin*, 72: 1160-1183.
- Peng J B, Sun X H, Lu Q Z, Meng L C, He H Q, Qiao J W, Wang F Y. 2020. Characteristics and mechanisms for the origin of earth fissures in the Fenwei Basin, China. *Engineering Geology*, 266: 105445.
- Valencia F, Laya J C. 2020. Deep-burial dissolution in an Oligocene-Miocene giant carbonate reservoir (Perla Limestone), Gulf of Venezuela Basin: implications on microporosity development. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104144.
- Wu G P, Chen G X, Chai J Z, Mao J, Wang H Y, Wang D T. 2025. Study on the spatial characteristics and controlling factors of subsurface temperature field in concealed salt lake geothermal reservoir, Yuncheng City, Shanxi Province, China. *Geothermics*, 131: 103378.
- Yang C S, Zhang F, Liu R C, Hou J G, Zhang Q, Zhao C Y. 2020. Ground deformation and fissure activity of the Yuncheng Basin (China) revealed by multiband time series in SAR. *Advances in Space Research*, 66: 490-504.

(责任编辑 郑秀娟)