

## 雄安新区雾迷山组岩溶热储成储机制及发育模式<sup>\*</sup>

郭瑞婧<sup>1,2</sup> 纪友亮<sup>1,2</sup> 马铮涛<sup>1,2</sup> 万宏峰<sup>1,2</sup> 杨栋吉<sup>1,2</sup> 季汉成<sup>1,2</sup>  
鲍志东<sup>1,2</sup> 周 勇<sup>1,2</sup> 房 超<sup>1,2</sup> 鲁 锴<sup>1,2</sup> 刘金侠<sup>3</sup>

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083

**摘 要** 雄安新区雾迷山组地热资源丰富, 研究其岩溶热储特征及其形成机理对于雄安新区清洁地热资源的开发利用具有重要的理论意义和实用价值。前人已经对该区雾迷山组油气储集层的分布、古岩溶、成岩作用、储集空间等特征做过一定的研究, 但对于该区雾迷山组地热资源的成储机制、特别是 3 期岩溶等成岩特征尚缺乏系统性的研究。充分利用野外露头、岩心、薄片和测录井等地质及地球物理资料, 并结合区域地质背景的分析, 对雄安新区雾迷山组的岩石学特征、成岩作用、岩溶热储的成储机制进行了深入研究, 并建立了雄安新区雾迷山组岩溶热储的发育模式。结果表明: (1) 雄安新区雾迷山组主要岩性为白云岩, 主要的储集空间为次生孔隙和构造缝—构造溶蚀缝, 热储孔渗变化较大; (2) 雄安新区最主要的建设性成岩作用是 3 种溶蚀作用, 包括同生—准同生溶蚀、表生溶蚀和埋藏溶蚀, 主要破坏性成岩作用是压实作用和胶结作用; (3) 根据构造演化、岩心及测井资料, 将表生溶蚀作用划分为 3 期, 分别是芹峪期、印支期和燕山—喜山期。芹峪期雾迷山组局部出露遭受淋滤, 形成的溶孔经后期改造后不易识别; 印支期大部分区域抬升并遭受淋滤, 形成高孔渗储集层, 后期遭受了进一步改造; 燕山—喜山期是雄安新区规模最大、影响最广泛的表生岩溶作用形成期, 对前期的储集层进一步淋滤、改造, 形成大范围的优质储集层。最后提出了雄安新区雾迷山组优质岩溶热储的成储机制与模式, 指出了岩溶热储的有利发育区。

**关键词** 雄安新区 雾迷山组 岩溶热储 压实胶结 表生溶蚀 燕山—喜山期

**第一作者简介** 郭瑞婧, 女, 1994 年生, 中国石油大学(北京)博士研究生。E-mail: wo2666007@163.com。

**通讯作者简介** 纪友亮, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 中国石油大学(北京)博士研究生导师。研究方向为储层地质学和层序地层学。E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn。

中图分类号: P588.24<sup>+</sup> 5 文献标志码: A

## Mechanism and development model of karst reservoir in the Wumishan Formation in Xiong'an New Area

GUO Ruijing<sup>1,2</sup> JI Youliang<sup>1,2</sup> MA Zhengtao<sup>1,2</sup> WAN Hongfeng<sup>1,2</sup> YANG Dongji<sup>1,2</sup> JI Hancheng<sup>1,2</sup>  
BAO Zhidong<sup>1,2</sup> ZHOU Yong<sup>1,2</sup> FANG Chao<sup>1,2</sup> LU Kai<sup>1,2</sup> LIU Jinxia<sup>3</sup>

1 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Sinopec Star Petroleum Co. Ltd., Beijing 100083, China

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划专项(编号: 2018YFC0604304, 2017YFC0603104)资助。[Financially supported by the National Key Research and Development Programs of China (Nos. 2018YFC0604304, 2017YFC0603104)]

收稿日期: 2022-02-25 改回日期: 2022-04-29

**Abstract** There are abundant geothermal resources in the Wumishan Formation of Xiong'an New Area. Studying the characteristics and main controlling factors of high-quality karstic geothermal reservoirs in the Wumishan Formation is the foundation of the geothermal resources exploration. Previous work has analyzed the distribution, diagenesis, reservoir space of the karst reservoir of the Wumishan Formation. However, there are limited work has been carried to understand the reservoir mechanism, especially for karst characteristics of three different stages. We analyzed the diagenesis types and the transformation mechanism of the Wumishan Formation in study area, based on field outcrops core data, thin section and logging data. The results show that: (1) The main lithology in the study area is dolomite, and the main storage spaces are secondary pores and structural-dissolution cracks. (2) The most constructive diagenesis is epigenetic dissolution, the most destructive diagenesis is compaction and cementation. (3) We divide epigenetic dissolution into three stages: including Qinyu stage, Indosinian stage and Yanshanian-Himalayan stage. Local outcrops of the Wumishan Formation during the Qinyu Movement were leached, however, the formed dissolved pores are not easy to identify after later rework. During Indosinian movement, most of study areas were uplifted and leached, which were further reworked. The Yanshanian-Himalayan period was the epigenetic karstification with the largest scale and the most extensive influence in the study area, which further leached and reworked the earlier reservoirs to form large-scale high-quality reservoirs. Finally, we raised the formation mechanism and model of high-quality karst thermal storage in the Wumishan formation in Xiong'an New Area, and pointed out the favorite area of karst reservoir.

**Key words** Xiong'an New Area, Wumishan Formation, karst geothermal reservoir, compaction cementation, supergene karst, Yanshanian-Himalayan stage

**About the first author** GUO Ruijing, born in 1994, is a Ph.D. candidate of China University of Petroleum (Beijing). E-mail: wo2666007@163.com.

**About the corresponding author** JI Youliang, born in 1962, Ph. D., is a professor and doctoral supervisor in China University of Petroleum (Beijing). His research interests are reservoir geology and sequence stratigraphy. E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn.

地热资源作为可循环利用的清洁、绿色能源，在国内外正受到越来越多的关注和应用，在一定程度上被视为能够缓解和替代化石能源的重要战略资源之一（Fridleifsson, 2001; Jiang *et al.*, 2019）。雄安新区因其地理优势及独特的地质结构，被作为中国“千年大计”中清洁地热能源开发的重点区域。雄安新区地热资源丰富，具有埋藏浅、储量大、水质优等特点。据国家方针，未来雄安新区将实现零污染、零排放的宏大目标，因而地热作为该地清洁能源，其重要性不言而喻。前人研究认为该区碳酸盐岩储集层属于岩溶风化壳，并以喜山期大规模裂谷作用形成的潜山式岩溶储集层为主（陈墨香等，1982；周瑞良，1987；张以明等，2017）。但对于区域内地热储集层的研究则主要为地热资源评价，研究内容多限于储集层分布、温度和出水量，且研究范围多局限于雄县、安新、容城县城周

边，研究深度局限在浅层的新近系砂岩储集层和蓟县系岩溶热储（王贵玲等，2017；吴爱民等，2018），对于雾迷山组岩溶热储的研究近几年有所突破，其中包括对裂隙发育特征、岩溶热储特征等的研究（鲁锴等，2019；戴明刚等，2020；唐博宁等，2020）。成岩作用是影响储集层的主要因素，对储集层孔隙的形成、保存和破坏有重要的影响，前人已经对该区雾迷山组油气储集层的分布、古岩溶、成岩作用、储集空间等特征做过一定的研究，但对于该区雾迷山组地热资源的成储机制、特别是3期岩溶等成岩特征尚缺乏系统性的研究。因此，为了满足雄安新区清洁能源供应的需求，中元古界蓟县系雾迷山组的储集性能好、出水量大、易于回灌的岩溶热储，成为研究区目前地热资源勘探的重点。但由于雾迷山组地质年代老、演化历史长、后期改造强烈，导致该区形成热储的成岩作用难以识

别,各成岩作用对于岩溶热储的控制作用也尚不清楚,因此亟需对雾迷山组岩溶热储发育过程中经历的成岩作用进行系统研究。

在前人的研究基础上,结合野外、岩心、薄片以及钻井、测井、录井等资料,以雄安新区为重点,对包括其周边共约 3400 km<sup>2</sup> 的区域进行研究,明确了雄安新区及周边雾迷山组经历各类成岩作用,分析了各成岩作用对岩溶热储演化的控制作用,进而对岩溶热储的发育特征进行分析,提出了雄安新区雾迷山组优质岩溶热储的成储机制与模式,最终预测了雄安新区及周边雾迷山组有利勘探靶区,以期对雄安新区及周边地热资源的开发利用提供支撑。

## 1 区域地质概况

雄安新区地处河北省保定市,规划范围包括了雄县、容城、安新等 3 县和部分周边地区,起步区面积约 100 km<sup>2</sup>。构造上雄安新区位于冀中坳陷的北部,区内分布着从属于冀中坳陷的 9 个四级构造单元,主要包括 3 个凸起(牛驼镇凸起、容城凸起和高阳低凸起)、2 个斜坡(牛北斜坡和蠡县斜坡)以及 4 个凹陷(霸县凹陷、徐水凹陷、饶阳凹陷和保定凹陷)。区内分布 7 条主要断裂,包括北东向的容城断裂、牛东断裂、保定断裂、高阳断裂和任西断裂,北西西向的容南断裂和牛南断裂(图 1)。

雄安新区自太古宙以来,经历了漫长而复杂的地质演化过程(Sun and Niu, 2000; Zhu *et al.*, 2011),基底形成于太古宙和古元古宙期间,经历了凌源、芹峪、印支、燕山和早喜山 5 期构造抬升作用(乔秀夫和马丽芳, 1982; 杨明慧等, 2002)。在多次克拉通化事件和构造—热事件作用下,基底不断地增生、拼贴、扩大,在经历了形成、形变、固化之后,形成了统一的结晶基底。蓟县系碳酸盐岩沉积形成于中—新元古代,后期基底抬升至地表后发生裂陷作用,地层遭受一定程度的剥蚀作用;古生代和早—中三叠世期间,构造活动较弱,整体以稳定抬升为主,主要沉积寒武系、奥陶系、石炭系等(Qi *et al.*, 2003)。从燕山运动开始,太平洋板块俯冲使得陆块活化、破坏,产生了强烈的构造运动,陆块发生了大规模的拉张开裂、裂陷解体,同时伴有强烈的岩浆活动,形成了不同

时期、广泛分布的各种陆相盆地(Ma *et al.*, 1983),冀中坳陷内部凸起和凹陷相间发育的格局至此形成。牛驼镇凸起和容城凸起在渐新世期间保持抬升,上部地层从古近系至雾迷山组均遭遇严重的风化剥蚀;高阳低凸起则受到相对较弱的剥蚀作用,沉积地层较薄。中新世期间,牛驼镇凸起、容城凸起继承了前期的构造特征,继续遭受抬升剥蚀;直至上新世的明化镇组沉积时期,冀中坳陷全区进入沉降阶段,最终形成现今的地质面貌(Yang *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016; 柳娟, 2018)。

雄安新区位于华北平原,是中—新生代沉积盆地。基底为太古界和下元古界复杂变质岩系,盖层为中上元古界、下古生界海相碳酸盐岩和新生界陆相碎屑岩 2 套沉积层组成。本次目的层位为中上元古界雾迷山组,下伏杨庄组,上覆洪水庄组。雾迷山组在研究区内共发育四段,自下而上分别为雾一段、雾二段、雾三段和雾四段,各段界面识别特征及岩性描述如图 1 所示。由于遭受强烈剥蚀,雾四段在容城凸起和牛驼镇凸起等局部地区有所缺失,雾迷山组厚度整体向南西方向减薄。

## 2 岩溶热储基本特征

### 2.1 岩石学特征

对雄安新区雾迷山组 20 个样品进行全岩 XRD 分析,结果表明:白云石含量占 65.5%,方解石含量占 5.5%,石英含量占 20.2%,黏土矿物占 8.7%,分析得出主要岩性为白云岩。并结合 15 口取心井中的 256 张薄片的岩性分析结果,最终根据是否保留原始结构,将雄安新区雾迷山组白云岩分为两大类:一类是保留(残余)原始结构的白云岩,包括颗粒白云岩和藻白云岩;另一类是次生交代成因白云岩,包括晶粒白云岩和次生角砾白云岩。

#### 2.1.1 保留(残余)原始结构的白云岩

颗粒白云岩:主要包括砂砾屑白云岩和鲕粒白云岩。其中砂砾屑白云岩的砂砾屑圆度中等,分选较好,砂砾屑之间不接触,呈漂浮状且杂乱分布(图 2-a);鲕粒白云岩的鲕粒颗粒较大,圆度较好,鲕粒之间的孔隙充填物为亮晶胶结物,反映沉积过程中的水动力条件较强(图 2-b)。

藻白云岩:主要包括叠层石白云岩和藻粘结白

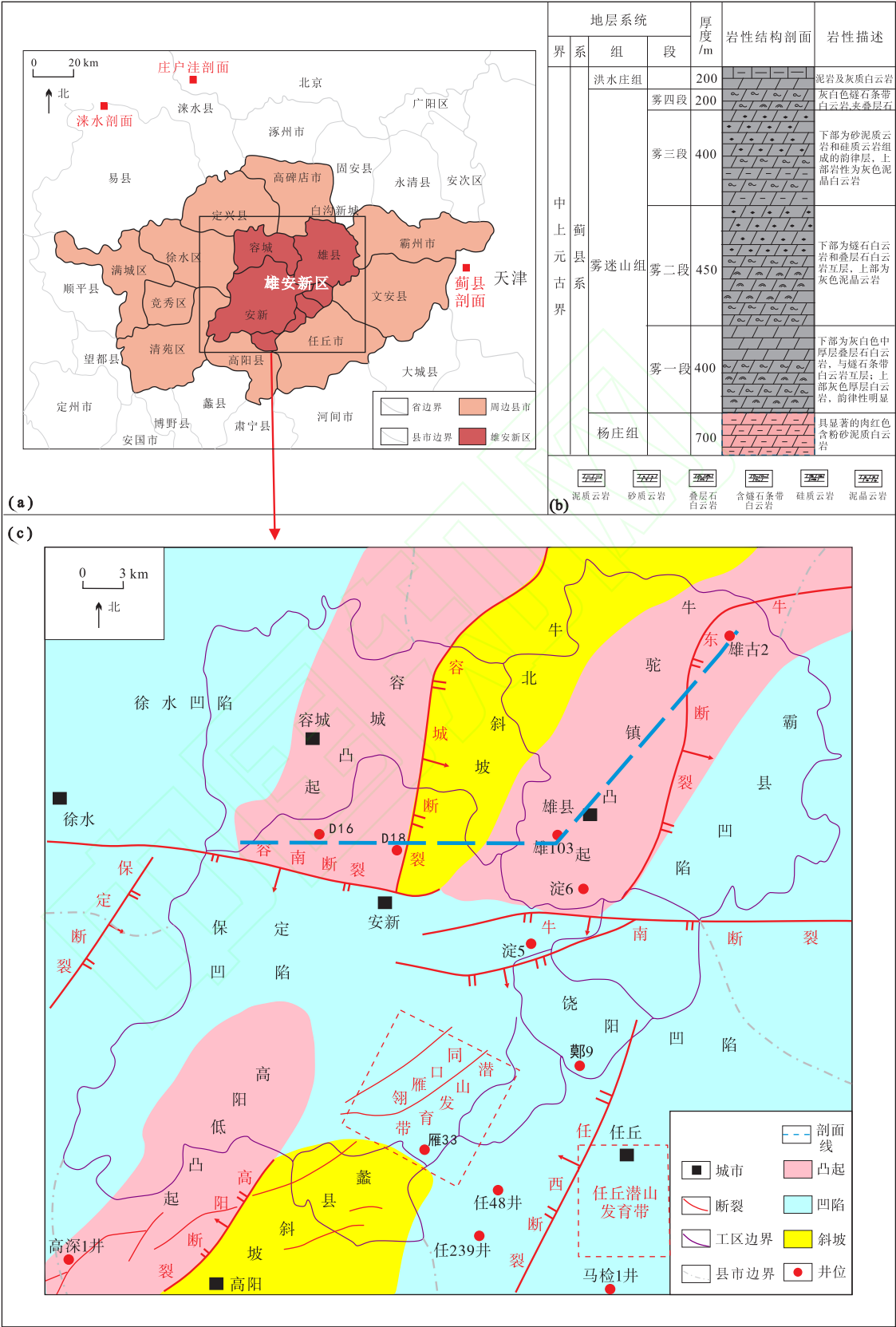
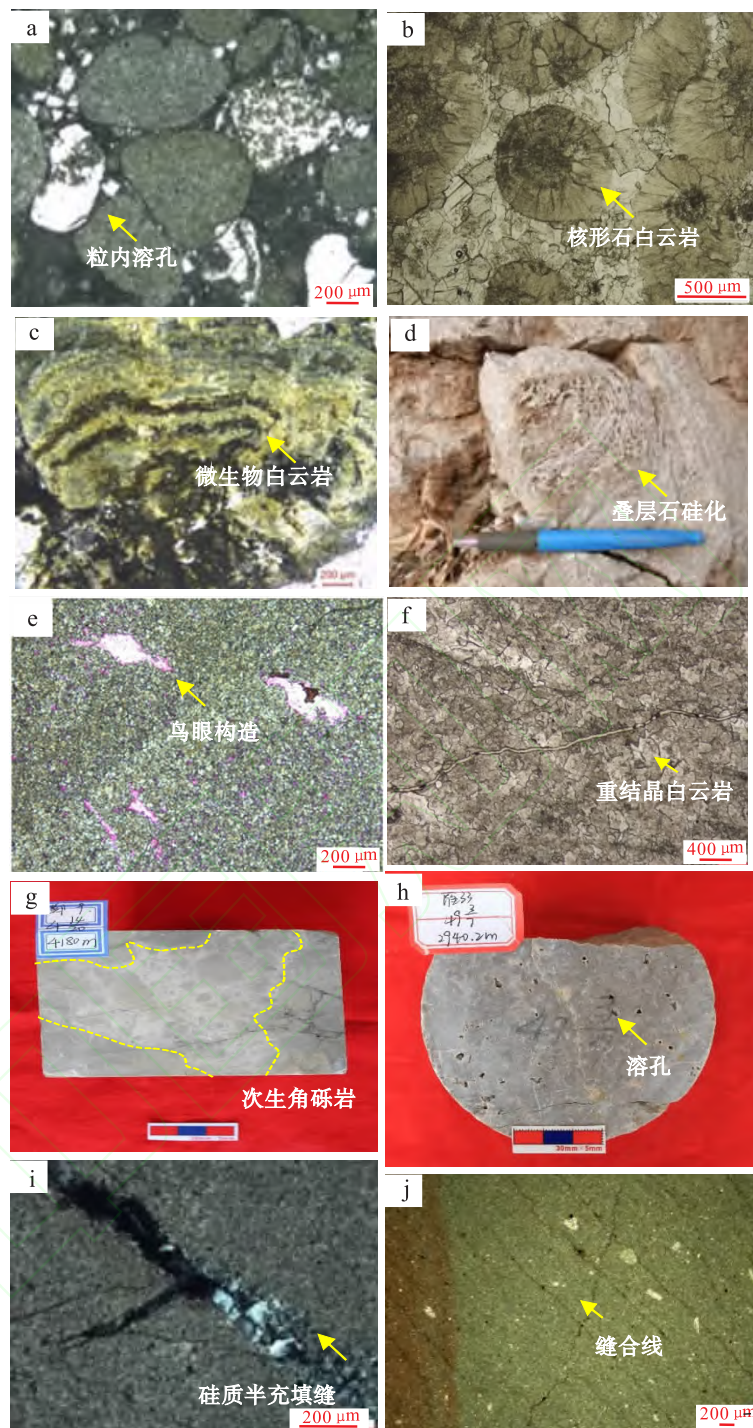


图 1 雄安新区雾迷山组构造单元分布图及地层格架

Fig. 1 Tectonic units and stratigraphic columns of the Wumishan Formation in Xiong'an New Area





a—砂屑云岩, 粒内溶孔和铸模孔, 高深 1 井, 雾迷山组, (-); b—核形石白云岩, 白云石粒状胶结, 蓟县剖面, 雾迷山组, (-); c—凝块白云岩, 微生物白云化作用, 涑水剖面, 雾迷山组, (-); d—丘状叠层石云岩, 沿叠层石硅化, D16 井, 雾迷山组; e—泥粉晶白云岩, 准同生白云化作用, 鸟眼构造, 涑水剖面, 雾迷山组, (+); f—重结晶白云岩, 马检 1 井, 2600.74 m, 雾迷山组, (-); g—次生角砾白云岩, 溶洞被角砾充填, 郑 9 井, 4180 m, 雾迷山组; h—细晶云岩, 选择性溶蚀孔洞, 雁 33 井, 2940.2 m 雾迷山组; i—泥晶云岩, 半充填构造缝, 高深 1 井, 3760.53 m, 雾迷山组, (+); j—泥粉晶白云岩, 缝合线, 任 48 井, 2690.34 m, 雾迷山组 (+)

注: 蓟县剖面、庄户洼剖面和涑水剖面 (位置如图 1-a 所示) 为邻区资料, 虽不在研究区内, 但调研发现其蓟县系雾迷山组和研究区内为同时期沉积, 具有相似的岩溶储集层特征, 故具有很大的参考价值

图 2 雄安新区雾迷山组岩性及物性特征

Fig. 2 Physical properties and lithology characteristics of the Wumishan Formation in Xiong'an New Area

云岩。研究区发育有层状、波状、球状等叠层石, 以波状叠层石发育最为广泛(图 2-c, 2-d), 其连续性和波高波长各有不同, 雾迷山组各段均可见; 藻粘结白云岩是由藻类粘结云泥和颗粒而成, 主要发育于雾一段, 粘结云泥多发生重结晶作用。

### 2.1.2 次生交代成因白云岩

晶粒白云岩: 主要包括泥粉晶白云岩和细晶白云岩。泥粉晶白云岩包括由泥晶白云石组成的泥晶白云岩、由粉晶白云石组成的粉晶白云岩和由泥晶白云石与粉晶白云石组成的粉—泥晶白云岩(图 2-e); 细晶白云岩中晶粒有大有小, 晶体自形程度高, 以线接触为主, 可见镶嵌式接触, 未见晶间孔发育(图 2-f)。

次生角砾白云岩: 角砾呈高度棱角状(图 2-g), 毫无分选, 成分单一, 与稀盐酸作用不起泡, 质纯, 为白云岩角砾。

## 2.2 储集空间特征

储集空间分为孔隙和裂缝。根据成因将孔隙划分为原生孔隙和次生孔隙; 裂缝包括构造缝—构造溶蚀缝和缝合线, 其中最有利于的储集空间类型为次生孔隙和构造缝—构造溶蚀缝。通过对全区共 15 口典型井、4 条野外剖面、256 张薄片进行统计, 次生孔隙体积约占总孔隙体积的 57.5%, 构造缝—构造溶蚀缝约占 23.4%, 其他类型孔隙约占 19.1%。

孔隙: 原生孔隙主要为藻格架孔, 多发育在藻白云岩和叠层石白云岩中(图 2-c), 此外还发育有少量晶间孔(图 2-d); 次生孔隙包括粒间孔、粒内孔和岩溶孔隙(图 2-a, 2-h), 因该区粒间孔和粒内孔多为后期溶蚀作用形成, 颗粒边缘具港湾状, 因而归入次生孔隙类型。

裂缝: 构造缝—构造溶蚀缝特点为平直、光滑、宽窄均一, 构造溶蚀缝缝面不规则、凹凸不

平、缝宽变化大, 具明显溶蚀特征(图 2-i); 缝合线多顺层分布, 呈折线型, 充填物为泥质或暗色物质(图 2-j)。

## 2.3 物性特征

对研究区典型钻井岩心共 15 口井 76 件柱塞样品进行物性分析, 测试单位为中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室。统计发现雾迷山组区域孔隙度整体在 5.5% 以内, 平均孔隙度为 2.8%; 渗透率整体在  $(0.01 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间, 平均值为  $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 由孔渗交汇图可知研究区孔渗相关性较好, 随孔隙度增加, 渗透率呈增加趋势, 表现为正相关关系, 局部地区存在裂缝, 渗透率表现为异常高值(图 3)。此外研究区孔渗数据变化较大, 具有分区特点, 研究区热储物性包括 3 个高值分布区: 一个高值区分布在雄县附近, 孔隙度数值多为 3.5%~6%, 渗透率数值多为  $(15 \sim 35) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 其次物性较好的区域在高阳一带, 孔隙度分布在 4%~5% 之间, 渗透率主体分布在  $(20 \sim 25) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间; 第 3 个高值区分布在容城附近一带, 孔隙度分布在 4%~4.5% 之间, 渗透率分布在  $(20 \sim 25) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间。其余地区孔隙度主要分布在 3.5% 以下, 渗透率则主要分布于  $15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  以下。

## 2.4 成岩作用类型及其特征

雄安新区雾迷山组热储成岩作用种类多, 主要有胶结、白云化、硅化、溶蚀与充填、重结晶、压实与压溶和构造破裂作用。

胶结作用: 胶结作用具世代现象(图 2-b; 图 4-a), 发生于准同生期的第 1 期次胶结呈纤状, 属于早期胶结, 形成环境为海底环境; 第 2 期次胶结呈栉壳状, 指示浅埋藏成岩环境; 第 3 期次胶结为镶嵌胶结, 发育于粒间孔。由于胶结物充填粒间

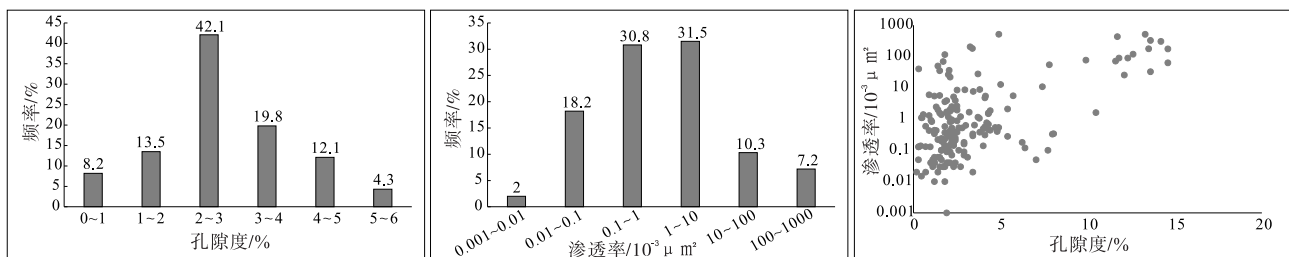
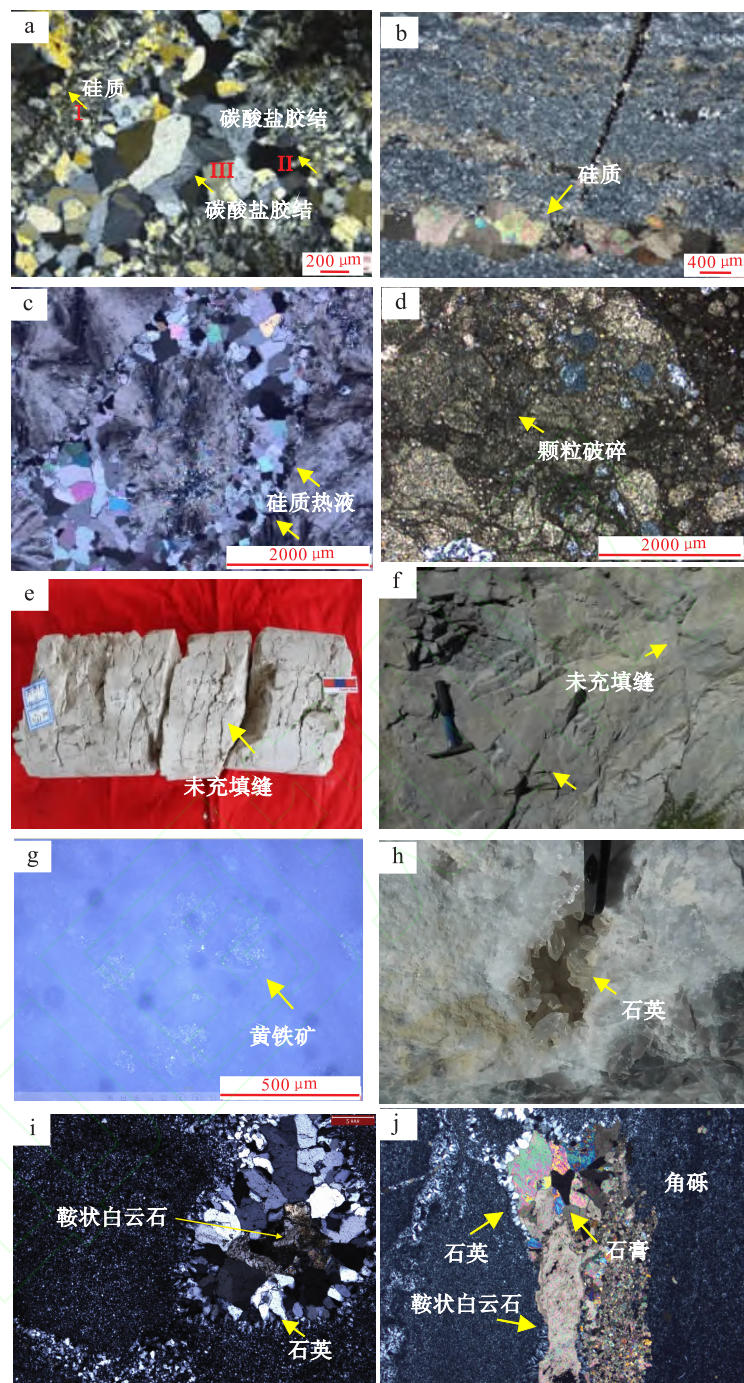


图 3 雄安新区雾迷山组孔隙度(左)、渗透率(中)分布直方图和孔渗关系图(右)

Fig. 3 Distribution histogram of porosity (left) and permeability (middle), relationship between porosity and permeability (right) of the Wumishan Formation in Xiong'an New Area





a—凝块石灰岩，世代胶结，第Ⅰ期为硅质胶结，第Ⅱ期呈马牙状碳酸盐岩胶结，第Ⅲ期呈粒状镶嵌胶结，雾迷山组，蓟县剖面，(+)；b—叠层石云岩，高温热液硅质交代，马检1井，2599.22 m，雾迷山组，(+)；c—白云石颗粒，内部热液溶蚀，外部边界保留，任239井，3105.94 m，雾迷山组，(+)；d—颗粒白云岩，颗粒破碎，马检1井，2743.5 m，雾迷山组，(+)；e—细晶云岩，未充填构造缝，高深1井，3762.8 m，雾迷山组；f—泥晶云岩，高角度缝，裂缝宽度大，未充填，涞水剖面，雾迷山组；g—泥晶灰岩，黄铁矿零星分布，任239井，3109 m，雾迷山组，(反射光)；h—热液溶蚀，孔洞为自形石英半充填，庄户洼剖面，雾迷山组；i—溶孔中充填石英和鞍状白云石，庄户洼剖面，雾迷山组，(+)；j—角砾岩，为热液硅质胶结，角砾间见石英、石膏和鞍状白云石充填物，任239井，3109 m，(+)。

注：蓟县剖面、庄户洼剖面和涞水剖面（位置如图1-a所示）为邻区资料，虽不在研究区内，但调研发现其蓟县系雾迷山组和研究区内为同时期沉积，具有相似的岩溶储集层特征，故具有很大的参考价值。

图4 雄安新区雾迷山组成岩作用特征

Fig. 4 Diagenesis characteristics of the Wumishan Formation in Xiong'an New Area

孔,导致岩石原生孔降低。

白云化作用:白云化作用主要为准同生白云化(图 2-e)和微生物白云化作用(图 2-c)。研究区雾迷山组发育的白云岩中,方解石含量很少或几乎没有,主要为等体积或过白云化作用形成。

硅化作用:硅化作用主要包括硅质交代及硅化充填作用。硅质交代作用多发生在叠层石和藻等微生物颗粒发育层段(图 2-d),发育时间较早,主要原因是有机质分解过程中产生有机酸,在其周围形成弱酸性环境,有利于  $\text{SiO}_2$  的沉淀与交代。此类硅化作用发生时间早,多为沉积物处于埋藏较浅的环境下,由其中呈分散状的  $\text{SiO}_2$  再聚集、交代而成;而硅质充填作用多为岩浆热液的侵入造成,可见粒间孔和构造缝中充填石英(图 4-b, 4-c),且主要分布于大型断裂与侵入岩体附近,多与粗晶白云石、鞍状白云石、石膏等热液矿物组合充填于构造裂缝和孔隙空间中。

溶蚀作用:主要发育准同生溶蚀、表生溶蚀和埋藏溶蚀作用,是研究区最主要的成岩作用。准同生溶蚀作用常形成选择性溶蚀孔洞,粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔等发育(图 2-a, 2-h);与表生岩溶作用不同,准同生岩溶发育早,多具选择性且规模较小。而表生岩溶作用规模较大,由于伴随强烈的构造运动,多形成大型溶洞和垮塌角砾岩(图 2-g)。埋藏岩溶作用主要有热液溶蚀和有机酸溶蚀,多发育于断裂附近。

重结晶作用:重结晶作用在研究区整体不发育,且主要为减孔作用。晶间孔多被晶体占据而不发育(图 2-f),对热储孔隙的影响较小。

压实—压溶作用:压实作用在研究区一直较为发育,具颗粒破碎现象(图 4-d),后期由于埋藏逐渐变深,压溶作用进一步增强,出现缝合线(图 2-j)等现象。

构造破裂作用:雄安新区主要存在 2 期破裂作用,第 1 期裂缝产生于印支构造运动期间,裂缝宽度较大,延伸较远,未充填—半充填(图 2-i; 图 4-e);第 2 期裂缝形成于燕山—喜山期,裂缝宽度较大,延伸较远,但多为热液矿物充填,亦可见少量未充填裂缝(图 4-f)。

黄铁矿化作用:黄铁矿多与泥粉晶灰岩共生,粉晶大小,自形程度高,呈分散状或集合体分布(图 4-g),对热储孔隙的影响较小。

### 3 岩溶作用类型及主控因素

溶蚀作用是雄安新区雾迷山组岩溶热储增孔的最关键成岩作用,经实验观测和计算,溶蚀作用增孔率为 86%,是岩溶热储增孔的主要原因,因此将岩溶作用单独叙述。雄安新区共识别出 3 种岩溶作用,分别是同生—准同生溶蚀、表生溶蚀和埋藏溶蚀作用。

#### 3.1 3 种岩溶作用特征

1) 同生—准同生溶蚀。发生于准同生期大气淡水成岩环境,在潮坪带中以选择性溶蚀早期颗粒间不稳定矿物为特征(倪新锋等, 2010)。雄安新区同生—准同生溶蚀形成的孔洞常具有选择性,如粒内孔、粒间孔和铸模孔等;胶结物溶蚀具有选择性,可见鸟眼构造(图 2-e)、粒内溶孔、粒间溶孔(图 2-a),多是选择性溶蚀的结果。可见,该时期的溶蚀作用具有选择性,导致富碳酸盐岩纹层被溶蚀,而富藻纹层得以保留。

2) 表生溶蚀。表生溶蚀受控于古地貌形态,而古地貌又控制着地表和地下岩溶水流特征,进而控制了表生岩溶发育的深度、范围及强度(刘宏等, 2015)。结合构造演化史分析及岩心、测井标志,共识别出 3 期表生岩溶作用,形成时间分别为芹峪运动期间、印支运动期间和燕山—喜山运动期间,其中以燕山—喜山期构造运动最为强烈。表生岩溶作用的特征为发育不整合、岩溶角砾岩和古土壤等。岩心上可见非常明显的岩溶角砾岩(图 2-g);此外高角度溶沟和溶蚀扩大缝较为常见,多充填泥质或方解石(图 4-e)。

3) 埋藏溶蚀。多发生于中—晚成岩期的深埋藏阶段,以裂缝扩溶为主。研究区埋藏溶蚀多沿裂缝发育,热液或酸性流体对深埋藏沉积物进行了非选择性溶蚀,对前期岩溶具有改造作用。根据野外、岩心和薄片观察显示,雄安新区热液溶蚀孔洞中充填的热液矿物多样,可见热液溶蚀孔洞中充填有自形石英(图 4-h),镜下除石英外亦可见鞍状白云石充填物(图 4-i)。井下岩心也可见到角砾岩间大量的硅质胶结物,而通过薄片则可观察到除石英矿物外,还可见鞍状白云石和无水石膏充填物(图 4-j)。对 57 个流体包裹体样品测点进行分析,样品均选自雄安新区保定凹陷且地层深度相似的热液充填硅质矿物、碳酸盐和膏盐胶结物。结果显示



(图 5), 均一温度峰值有 2 个, 第 1 个分布区间为 60~80 °C 的正常地层温度, 第 2 个分布区间为 110~130 °C 的热液, 高于正常地层温度 30 °C 以上, 表明雄安新区与岩浆活动相关的热液溶蚀发育。

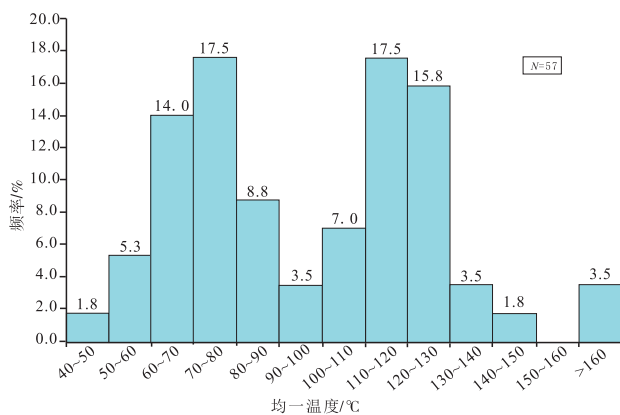


图 5 雄安新区雾迷山组硅质、碳酸盐与膏盐胶结物盐水包裹体均一温度分布直方图

Fig. 5 Distribution histogram of cementation temperatures of the Wumishan Formation in Xiong'an New Area

### 3.2 岩溶作用期次及主控因素

雄安新区岩溶作用受多种因素控制, 最主要的控制因素是构造运动, 影响较大的构造运动主要有芹峪运动、印支运动和燕山—喜山运动。本次研究以构造运动为纲, 对雄安新区岩溶期次进行划分,

研究成果显示, 雾迷山组在沉积后存在 3 套不整合面, 分别对应了 4 期古岩溶作用(图 6)。第 I 期古岩溶发生于雾迷山组同沉积时期, 主要包括准同生岩溶作用。第 II 期古岩溶对应于芹峪运动时期, 该运动使得研究区雾迷山组局部出露地表遭受剥蚀, 主要发生表生岩溶作用, 溶孔经后期改造不易识别; 加之流体顺着芹峪运动造成的裂缝进行溶蚀, 因而压溶作用和埋藏溶蚀作用相对发育。仅在工区外围南部约 30 km 处的衡 6 井发现雾一段和上覆寒武系分界线处, 自然伽马值突然增大(图 7)。第 III 期古岩溶对应于印支运动晚期, 主要是表生岩溶作用; 印支运动期间构造活动活跃, 由于受华北板块与扬子板块挤压作用和太平洋板块运动影响, 雄安新区大部分区域抬升并遭受表生淋滤作用(杨明慧等, 2001), 印支期后进入短暂的浅埋藏阶段, 沉积部分三叠系; 该时期形成了大型溶蚀孔洞缝, 形成高孔渗储集层。第 IV 期古岩溶对应于燕山—喜山期运动, 主要是表生岩溶作用和埋藏溶蚀作用; 燕山—喜山期受华北板块和太平洋板块运动影响, 该区新老断裂再次活动, 三叠系整体遭受剥蚀, 剥蚀作用强烈的地区可剥蚀至雾二段, 直至古近纪才开始接受沉积; 此阶段构造作用强烈, 地层缺失严重, 雾迷山组处于大气淡水环境, 接受大气淡水淋滤作用, 发生表生岩溶作用; 在燕山期—早

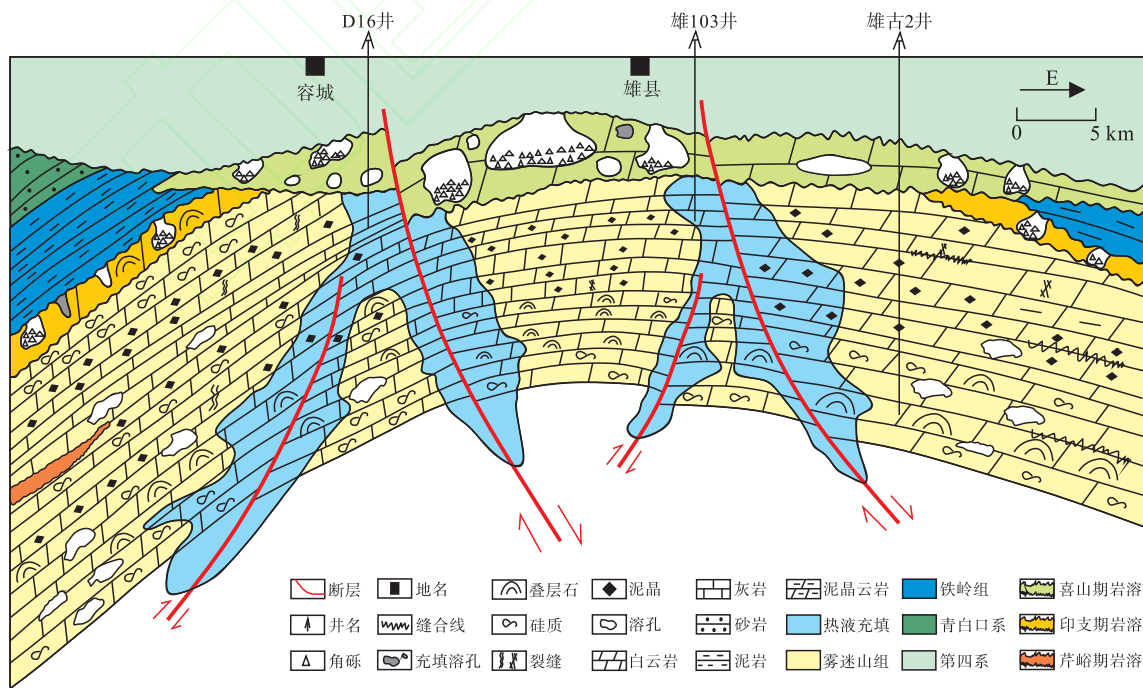


图 6 雄安新区各期次岩溶作用及时空分布 (剖面位置见图 1-c)

Fig. 6 Characteristics and distribution of Karst in each period in Xiong'an New Area (location seen Fig. 1-c)

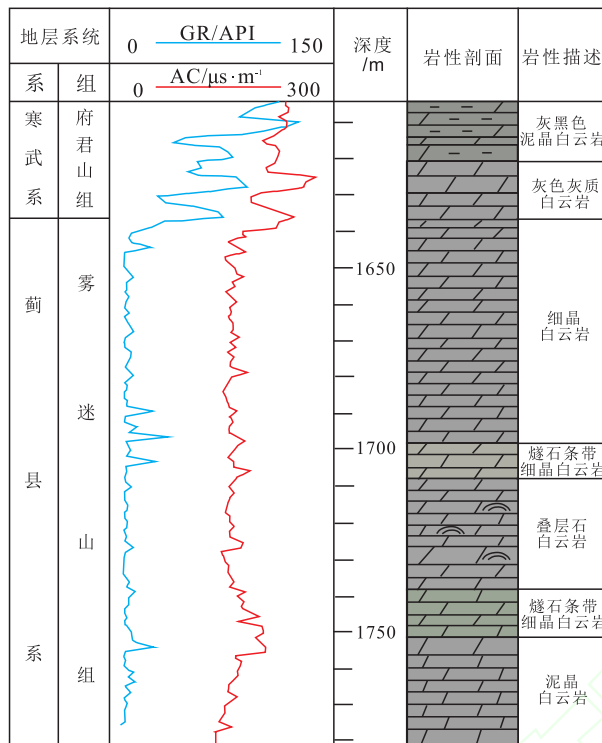


图 7 雄安新区衡 6 井单井柱状图

Fig. 7 Logging characteristics of the Wumishan Formation in well Heng 6 in Xiong'an New Area

喜山期阶段，岩浆活动发育，岩浆沿断裂运移形成溶蚀孔洞和热液充填。印支期和燕山—喜山期是对雄安新区影响最大的构造运动，地层经历了幅度较大的抬升剥蚀，两期构造运动相互叠加，形成了最为发育的表生岩溶作用。

## 4 岩溶热储成储机制

岩溶热储成储机制主要包括外部因素和内部因素 2 个方面，其中外部因素包括构造运动、海平面升降、气候等，内部因素主要包括岩性岩相、岩石内部构造等。通过对雄安新区雾迷山组岩溶热储特征进行研究，总结得出研究区岩溶热储的控制因素主要包括岩性岩相形成的基础、构造和古地貌的推动以及成岩作用的改造。

### 4.1 岩性与岩相是控制成储的基础

岩性与岩相是控制成岩作用的基础。碳酸盐岩的矿物成分是影响各类成岩作用强度的本质因素，不同的岩性、岩相会形成不同的岩石学特征，进而孔隙特征和成岩作用有差异，影响其孔渗特征。

雄安新区泥粉晶白云岩发育广泛，但原始孔隙欠发育，后期由白云化作用形成的晶间孔可以改善其物性，使得流体渗入发生进一步溶蚀；此外白云岩脆性大，易破裂，与灰质构成差异溶蚀，形成大型溶蚀孔洞。颗粒白云岩基质较颗粒易溶（聂跃平，1994），原生粒间孔发育，流体渗入使溶蚀作用加强，易形成良好的储集空间，是研究区最有利储集层发育的岩性，但因其分布少，难以形成以颗粒滩为主的有效储集层。次生角砾白云岩角砾多为白云石，难以通过溶蚀作用形成有效储集层。而藻白云岩分布广，原始藻格架和叠层石骨架原生孔隙较为发育，且后期构造作用下形成有效的次生孔隙，因而藻白云岩是最有利的储集层岩性（图 8 左）。

雄安新区雾迷山组发育的岩相主要有云坪、藻云坪、颗粒滩和泥云坪，其中云坪和藻云坪分布广泛，而颗粒滩和泥云坪分布较少，潮间带藻云坪相为储集层最优势相（图 8 右）。从高深 1 井岩心及薄片特征可以看出，潮间带藻云坪相多发育溶孔、藻格架孔等有利储集空间；而淀 5 井深埋藏区的潮下带云坪相泥粉晶白云岩和细晶白云岩则相对较为致密，孔隙不发育。沉积相带不同导致原生孔隙具有差异，进而控制着次生孔隙的发育（图 9）。潮间带水动力作用强，加之藻白云岩岩性特征利于次生孔隙发育，因此潮间带藻云坪为研究区最有利岩溶储集层的沉积基础。

### 4.2 多期构造运动和古地貌是成储的推动力

构造运动是控制岩溶作用的核心。构造运动对于岩溶储集层的控制作用主要表现在 3 个方面：既控制了成岩作用的发育背景和类型；又形成多类型多期次的裂缝，为流体渗流提供场所和条件；此外还决定了古地貌格局和水动力分布单元，进而影响古岩溶的发育和有利区的分布。古地貌是控制成岩作用的推动力，主要通过影响古水文特征对储集层进行改造。古地貌的分布对水动力条件和表生岩溶的发育具有明显的影响作用，不同古地貌单元是岩溶水循环的重要通道和制约因素。结合沉积学分析法、残厚法和印模法，并在构造演化和地层剥蚀的约束下恢复了雾迷山组顶部风化壳岩溶古地貌图（图 10 左）。在燕山—喜山期，雄安新区北东高、南西低，古水流流向为北东至南西向。在此方向上显示为岩溶高地、斜坡和盆地的逐渐变化。不同的

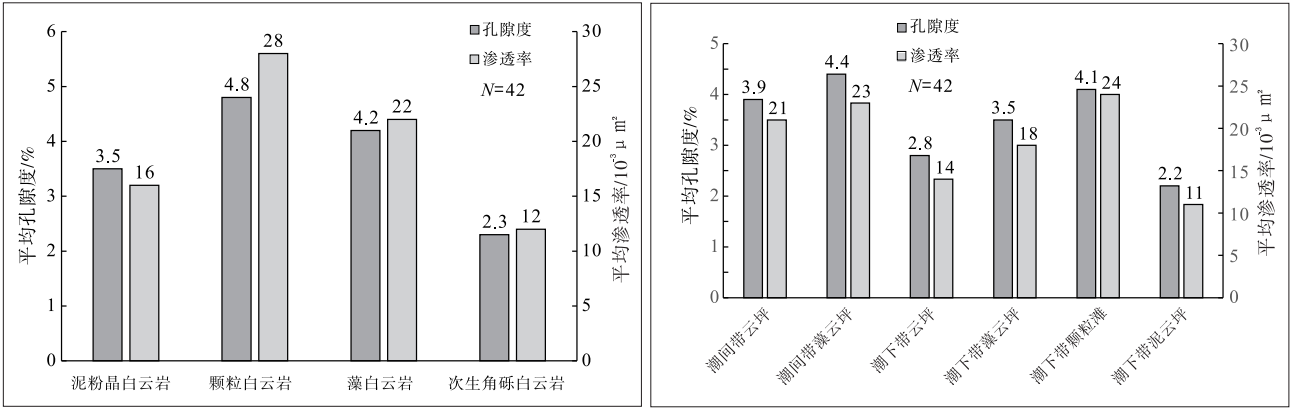


图 8 雄安新区雾迷山组岩性（左）、岩相（右）和孔渗关系对比图  
Fig. 8 Relationship among lithology (left), facies (right), porosity and permeability in Xiong'an New Area

表 1 雄安新区雾迷山组不同期次岩溶特征及证据  
Table 1 Karst characteristics and evidence of different stages in Xiong'an New Area

岩溶期次	岩溶类型	岩溶特征	构造背景	主要证据	补充证据
第Ⅰ期	准同生岩溶	顺层溶蚀孔洞；选择性溶蚀孔洞	雾迷山组同沉积时期	野外剖面可见顺层溶蚀孔洞、鸟眼构造等(图 2-a,2-e)	无
第Ⅱ期	表生岩溶 埋藏岩溶	溶孔受后期改造不易识别；仅在研究区南部雾一段有表生溶孔；测井上显示为自然伽马曲线界限清楚	芹峪运动	后期改造大；仅在研究区南部保留部分特征； 衡6井自然伽马值突然增大	衡6井雾一段和寒武系地层分界线自然伽马值突然增大(图 6)
第Ⅲ期	表生岩溶	溶蚀孔、缝大量发育；由于受第Ⅳ期岩溶叠加改造,特征不易识别	印支运动晚期；构造活动活跃	雄安新区西南部缺失雾四段、雾三段；高深1井雾二段裂缝发育(图 4-e)	受华北板块与扬子板块挤压作用和太平洋板块运动影响,研究区大部分区域抬升并遭受表生淋滤作用(杨明慧等,2001)
第Ⅳ期	表生岩溶 埋藏岩溶	雾迷山组上覆地层剥蚀严重,形成大量溶蚀孔缝；岩浆沿断裂运移形成溶蚀孔洞和热液充填	燕山—喜山期运动	大部分缺失雾四段；高深1井雾三段可见溶孔(图 9)等	无

岩溶发育带与不同的地貌单元具有良好的对应关系，且具有不同的溶蚀作用特征(图 10 右)。岩溶高地主要位于东北部容城凸起和牛驼镇凸起，风化淋滤作用十分强烈，大气淡水垂直渗流向下淋滤，运移通道是垂向发育的裂隙、节理和落水洞，水动力非常活跃；岩溶高地垂向的水动力条件控制了垂向缝洞系统的发育，但剥蚀作用强烈多充填角砾，导致孔隙度或渗透率有所降低。岩溶次高地位于南部高阳低凸起、同口—雁翎潜山带和任丘潜山带，地貌较岩溶高地低，剥蚀程度较岩溶高地弱，以垂直渗流作用为主，水动力较强，主要发育垂向溶孔和高角度缝；岩溶斜坡呈环状分布于高地周缘，主要以水平潜流作用为主，由于地貌高差较大，且位于潜水面以下，因此地下水流量大且流速快，水动力较强，从而对地层的化学和机械侵蚀强烈，溶蚀

的物质被水流迅速带走，溶蚀作用稳定；同时水平方向的水流作用易增加孔隙间连通性，进而提升有效孔隙度。岩溶盆地地势最低，位于雄安新区两侧，地下水以深部缓流和停滞水体为主，水动力弱，溶蚀作用最弱；且泥质充填和胶结作用强烈，破坏孔隙。综上，在构造运动、古地貌和古水文动力的综合作用下，岩溶斜坡为最有利储集层发育区，岩溶次高地为较有利发育区。

4.3 成岩作用是成储的关键改造作用

4.3.1 压实压溶作用对岩溶热储产生了双重作用

雄安新区雾迷山组由于埋藏深度大，地质历史时期最大埋深可接近 3000 m，因而整体上看雾迷山组岩溶储集层压实作用普遍发育。镜下主要表现为：(1) 压实程度较大时，部分刚性颗粒发生弯曲



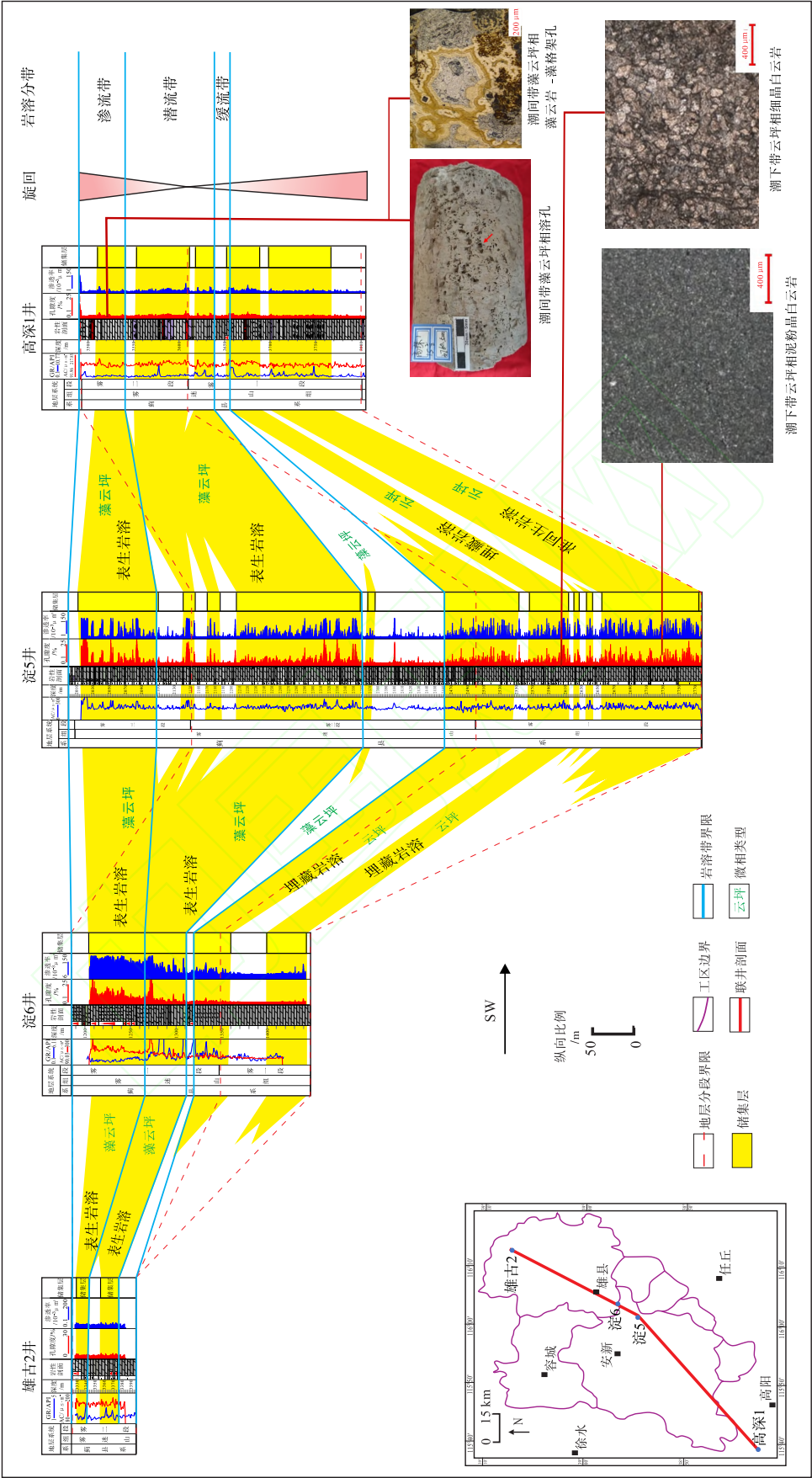


图 9 雄安新区相控储集层分布特征  
Fig. 9 Characteristic of the reservoir with facies controlling in Xiong'an New Area

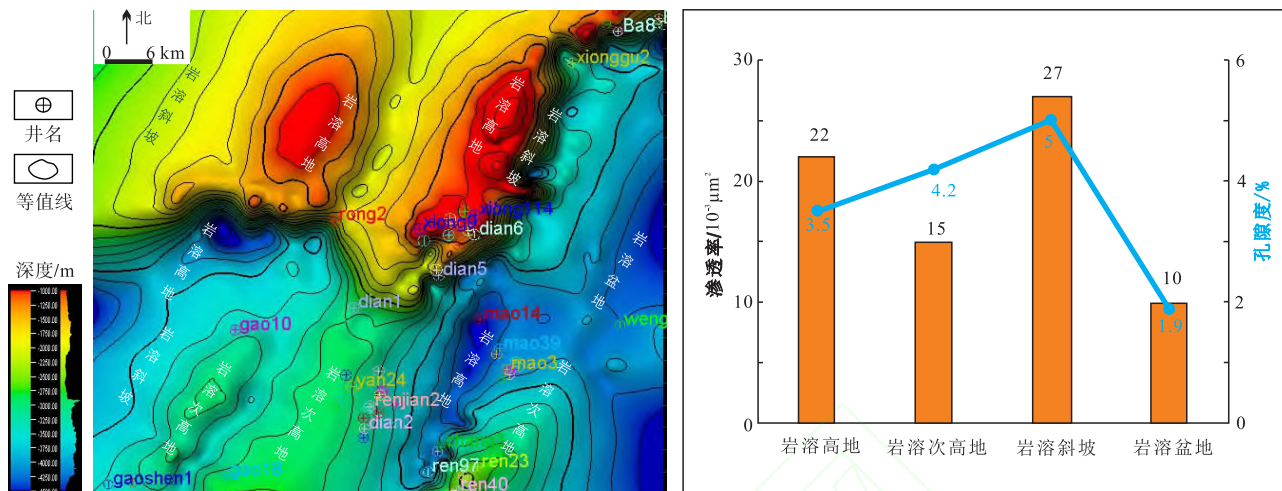


图 10 雄安新区雾迷山组岩溶古地貌 (左) 及其与孔渗关系特征 (右) 图

Fig. 10 Landform (left) and relationship with porosity and permeability (right) of the Wumishan Formation in Xiong'an New Area

变形, 当压力超过其承受能力时发生破裂 (图 4-d); (2) 当后期埋藏深度逐渐增加时, 压溶作用进一步增强, 出现缝合线等现象 (图 2-j); (3) 整体上看, 颗粒接触关系主要表现为线接触和凹凸接触 (图 4-d)。每张薄片选取 4 张显微镜下照片, 分别计算分选系数  $S_0$  和原始孔隙度, 取平均值作为最后结果; 再测出胶结物体积和压实后孔隙体积, 进而计算出压实减孔率。计算可得, 研究区储集层经压实作用孔隙度由 25.3% 降低到了 22.1%, 压实减孔率为 12.6%。

雄安新区内压实作用和压溶作用持续时间长, 几乎贯穿了同生—准同生成岩阶段到中—晚成岩阶段的全过程, 而在埋藏环境中影响更大。较强的压实作用使得原生孔隙消失殆尽, 颗粒接触更加紧密, 孔隙度和渗透率大幅度降低, 储集层物性急剧变差, 对于储集层的储集功能起到强烈的破坏作用。但后期的压溶作用造成颗粒接触点局部溶解, 对岩溶储集层具有一定的改善作用, 因此压实压溶作用对岩溶热储产生了双重作用。

#### 4.3.2 胶结、白云化和硅质作用对岩溶热储产生了减孔作用

雄安新区胶结作用具有世代胶结现象 (图 4-a), 胶结物多充填于原生孔隙和次生孔隙中, 使得储集层内的有效孔隙度降低, 胶结作用是发生在粒间孔隙水中的沉淀作用, 在粒间孔中发生晶体沉淀生长, 各类胶结物不仅占据了残余粒间孔, 使得残余粒间孔发育极少, 同时也占据了大量溶蚀作用

所形成的次生孔隙, 因而胶结作用对岩溶热储的孔隙度具有强烈的破坏作用。胶结作用从同生—准同生成岩阶段一直持续到了中—晚成岩阶段, 持续时间长, 且在早—中成岩阶段的埋藏环境中作用明显, 导致该时期孔隙度明显降低。

雄安新区白云石化作用主要为等体积或过白云石化作用形成, 因而白云石化作用对岩溶热储的孔隙多起破坏作用, 而白云石化作用主要发生于同生—准同生时期, 持续时间较短, 但由于发生白云石化的岩石较坚硬, 不利于准同生溶蚀作用的进行, 因此起到了降低孔隙度的破坏作用。

雄安新区硅质交代作用形成的硅化岩体与原岩产状一致, 原岩发生硅质交代作用后, 仍保留原有的叠层石等结构。硅化作用形成的含硅质岩类致密坚硬, 孔隙稀少, 硅质交代及充填作用使得岩溶热储的孔隙有所降低; 另一方面, 硅质热液矿物充填作用对岩溶热储也产生了强烈的减孔作用, 热液矿物充填作用主要发生于中—晚成岩阶段, 沿断裂对孔缝进行充填, 导致孔隙急剧降低。经实验观测和计算可得, 研究区经过压实、胶结作用、白云化和硅质作用减孔后, 剩余孔隙度为 0.7%, 其中胶结、白云化和硅质交代作用减孔率为 32.8%。

#### 4.3.3 多期构造破裂作用促进溶蚀作用发生

雄安新区雾迷山组在印支运动以及燕山—早喜山期出露地表遭受淋滤剥蚀, 形成的高角度缝成为了大气淡水向下渗滤的通道, 促进了溶蚀作用的进一步发生; 而低角度缝的存在, 增加了水和碳酸盐

岩地层的接触，小孔洞之间出现了连通，从而改善地层的储渗性能；缝合线也较为发育，缝合线是一种特殊的裂缝形式，但是在碳酸盐岩地层中发育普遍，可以有效地改善储集层的储渗能力，尤其是与构造缝的相互连通，为地下水和地表水的垂向运移提供了有利条件。

雄安新区多期构造运动形成的断裂、裂缝等，为流体的垂向运移提供了通道，为后期的表生溶蚀作用的发生提供了有利条件；此外裂缝的存在也为地下流体提供了运移通道，流体沿断层或裂缝优先对其充填物进行溶蚀，从而改善储集层的储集性。构造破裂作用在早一中成岩阶段和中一晚成岩阶段较为强烈，对该时期的储集空间有一定的改善作用，为溶蚀作用的产生奠定了坚实的基础。

#### 4.3.4 溶蚀作用是岩溶热储增孔的关键作用

溶蚀作用是雄安新区发育最广泛的成岩作用，扩大了储集空间、改善了储集性能，是对储集层增孔贡献最大的成岩作用。通过计算溶蚀面孔率，并分别对各类溶蚀作用进行增孔率计算，结果显示，储集层溶蚀增孔率为 40.5%，其中同生—准同生岩溶作用增孔率为 3.8%，表生溶蚀作用增孔率为 32.3%，埋藏溶蚀作用增孔率为 4.4%。

同生—准同生岩溶作用发生在同生—准同生成岩阶段，通常发育于大套厚层泥晶白云岩中夹薄层颗粒白云岩层，代表着海平面下降时间较短，允许准同生溶蚀作用发生的时间较短，导致早期溶蚀作用对储集层改造作用有限。埋藏岩溶的主要流体运移通道是前期未完全充填的断层、裂缝（赵国祥等，2016），大规模的对碳酸盐矿物欠饱和的、有腐蚀性的流体沿断层、裂缝输入储集层，并优先对各种孔缝及其充填物进行溶蚀，随后被溶解进入溶液的  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{Mg}^{2+}$  等离子沿断层、裂缝被流体不断的传送出去，形成溶蚀孔洞。表生溶蚀作用是雄安新区分布最广泛、增孔作用最大的建设性成岩作用，地层经历构造运动抬升地表，处于大气淡水环境遭受淋滤，且由于构造作用形成了断裂，大气淡水顺断裂向下侵蚀。燕山—喜山期是雾迷山组重要的成储时期，表生成岩环境中大气淡水的淋滤作用，使得雾迷山组形成大量溶蚀孔缝。这不仅增加了储集层中的储集空间，还沟通了碳酸盐岩中原本不连通的孔隙，改善了孔隙结构，提高了储集性能。

#### 4.3.5 成岩作用对岩溶热储的形成和改造

综合分析各成岩作用形成时间及成岩环境，以雄安新区大型构造演化为背景，建立了雾迷山组成岩作用对岩溶热储的形成和改造模式（图 11）。在同生期发生沉降并沉积了雾迷山组碳酸盐岩，主要为海水成岩环境，经历的成岩作用包括准同生溶蚀、准同生白云石化作用，后期逐渐出现相对较弱的压实、胶结和交代作用等。

早一中成岩阶段即芹峪运动阶段以前，雾迷山组构造活动较弱，几乎不受表生岩溶作用的影响。此阶段以压实—压溶作用和早期胶结作用为主，根据文献调研和镜下薄片观察，岩石原始孔隙度通常大于 30% 以上，细粒类碳酸盐岩原始孔隙度可高达 50% 以上，但经过准同生阶段胶结和压实作用的影响，孔隙度迅速减小到 3% 以下（Philip and Lloyd, 1970；鲁锴等，2019；杨飞，2017）。芹峪运动时期，将雾迷山组抬升至地表，接受大气淡水淋滤，发生表生岩溶作用。但由于此时期暴露持续时间较短，溶蚀作用较弱，热储物性改造较小。

成岩中—晚期，由于受到印支运动的影响，构造活动强烈，断裂体系发育，雾迷山组及上部地层遭受严重暴露剥蚀，期间经历的成岩作用包括表生溶蚀、埋藏溶蚀、破裂作用以及胶结、重结晶作用；形成了大量孔、缝等储集空间，使孔隙度增加大到 10% 左右。

在燕山—喜山初期，由于构造运动整体沉降，研究区雾迷山组再次进入埋藏阶段，发育破裂、胶结、埋藏溶蚀和压溶作用。此阶段岩浆活动发育，伴随有热液溶蚀作用及热液矿物充填。新生界烃源岩在古近纪大规模生烃，生成的有机酸对热储发生溶蚀，改善了热储储集性能。热液矿物对热储的影响具有双面性，矿物充填使得孔隙度降低，而埋藏溶蚀又使得孔隙度增加，整体孔隙度变化为先减小后增大再减小，最终孔隙度达 5% 左右（图 11）。

## 5 岩溶热储发育模式

雄安新区雾迷山组岩溶热储主要的成储机制包括岩性岩相基础、构造作用和古地貌的推动，以及各类型成岩作用的改造（图 12）。在岩性岩相上叠层石白云岩、藻白云岩易发生溶蚀作用，形成有效溶孔，而泥晶白云岩中溶孔多为准同生溶蚀作用形成，且后期深埋藏时经历压溶作用，形成了缝合



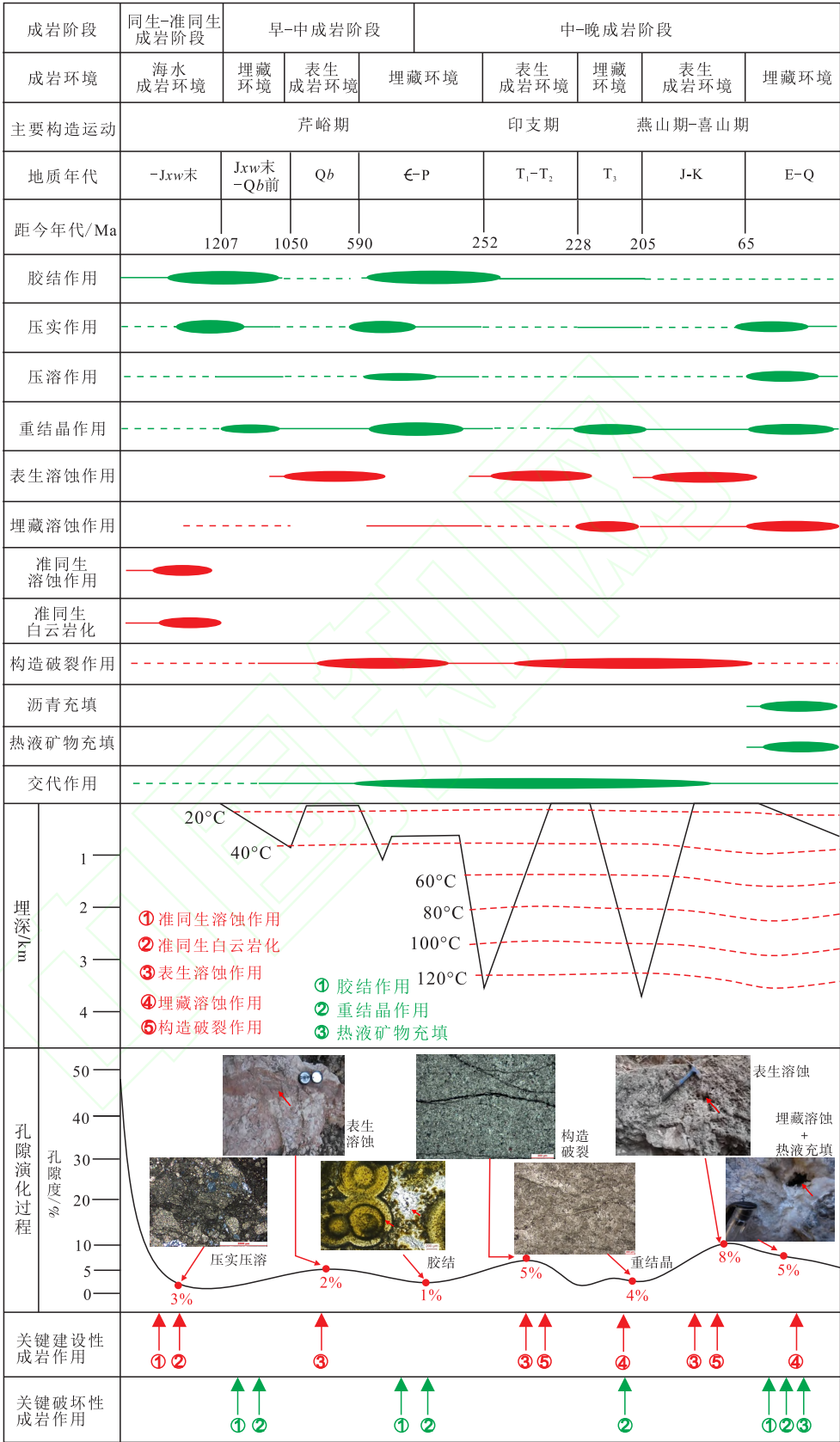


图 11 雄安新区雾迷山组岩溶热储改造模式

Fig. 11 Transformation model of karst thermal reservoir of the Wumishan Formation in Xiong'an New Area

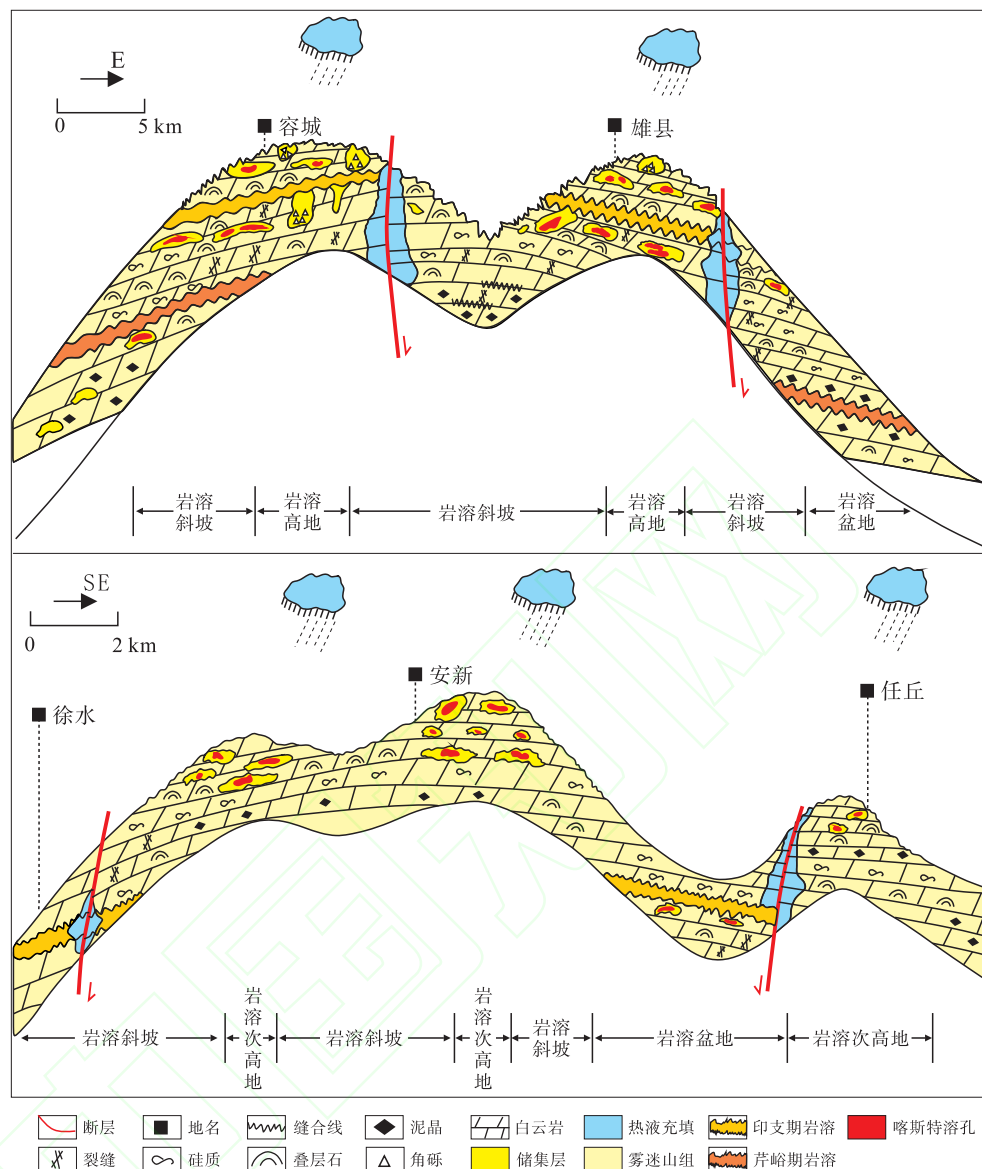


图 12 雄安新区雾迷山组岩溶热储成储模式

Fig. 12 Reservoir model of karst thermal reservoir of the Wumishan Formation in Xiong'an New Area

线。受构造作用影响，雄安新区主要的 3 期表生岩溶作用，为芹峪期岩溶、印支期岩溶和燕山—喜山期岩溶，其中芹峪期岩溶仅在局部发育，印支期岩溶和喜山期岩溶相互叠加，形成了大量的溶蚀孔缝；此外在断层发育的地区后期有热液充填现象。雄安新区主要的喀斯特溶蚀发生在岩溶高地、岩溶次高地和岩溶斜坡区，其中岩溶高地只接受垂直淋滤，胶结物和充填物不易被流水带走，形成的溶孔多为充填溶孔；而岩溶斜坡和岩溶次高地接受垂直淋滤和水平潜流的作用，形成的溶孔多被保存形成储集层。在各类成岩作用中，溶蚀作用是岩溶热储增孔的关键作用，胶结、白云化和硅质作用对岩溶

热储产生了破坏作用，而压实压溶作用对岩溶热储产生了双重作用。

## 6 结论

1) 雄安新区雾迷山组主要岩石类型包括颗粒白云岩、藻白云岩、晶粒白云岩和角砾白云岩等 4 类。雄安新区雾迷山组主要的储集空间类型为次生孔隙和构造缝—构造溶蚀缝，热储孔渗数据变化较大，孔隙度整体在 5.5% 以内，平均孔隙度为 2.8%；渗透率整体在  $(0.01 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间，平均值为  $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2) 雄安新区雾迷山组经历的主要成岩作用包括压实压溶作用、胶结作用、硅质交代作用、构造破裂作用和溶蚀作用, 其中胶结作用是主要的破坏性成岩作用, 导致岩溶热储孔隙度急剧降低; 而溶蚀作用是最主要的建设性成岩作用。

3) 雄安新区发育了 3 种岩溶作用, 分别是同生—准同生溶蚀、表生溶蚀和埋藏溶蚀作用, 以表生溶蚀作用发育最广泛、增孔作用最大。表生岩溶作用进一步划分为 3 期, 分别是芹峪期、印支期和燕山—喜山期表生岩溶作用。芹峪运动期雾迷山组局部出露遭受淋滤; 印支运动期研究区大部分区域抬升并遭受淋滤, 形成高孔渗储集层, 后期遭受进一步改造; 燕山—喜山期是研究区规模最大、影响最广泛的表生岩溶作用, 对先期储集层进一步淋滤、改造, 形成大范围优质储集层。

4) 雄安新区岩溶热储成储的控制因素主要包括岩性岩相特征、构造作用、古地貌以及各类成岩作用。优质岩溶热储的成储机制是: 藻云坪的优势相带是基础; 构造运动形成了芹峪期、印支期和喜山期岩溶, 促成大量溶蚀孔缝的发育; 岩溶斜坡为最有利储集层发育区, 岩溶次高地为较有利发育区。

### 参考文献 (References)

- 陈墨香, 黄歌山, 张文仁, 张容燕, 刘炳义. 1982. 冀中牛驼镇凸起地温场的特点及地下热水的开发利用. 地质科学, 17(3): 239-252. [Chen M X, Huang G S, Zhang W R, Zhang R Y, Liu B Y. 1982. The temperature distribution pattern and the utilization of geothermal water at Niutuozen basement protrusion of central Hebei Province. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 17(3): 239-252]
- 戴明刚, 马鹏鹏, 雷海飞, 胡甲国, 郭新锋, 张家云, 鲍志东. 2020. 雄安新区雾迷山组岩溶热储特征与有利区. 地质科学, 55(2): 487-505. [Dai M G, Ma P P, Lei H F, Hu J G, Guo X F, Zhang J Y, Bao Z D. 2020. Characteristics and favorable area prediction of karstic geothermal reservoirs of Wumishan Formation in Xiong'an New Area. Chinese Journal of Geology, 55(2): 487-505]
- 刘宏, 罗思聪, 谭秀成. 2015. 四川盆地灯影组古岩溶地貌恢复及地质意义. 第十三届全国古地理学与沉积学学术会议, 35. [Liu H, Luo S C, Tan X C. 2015. Restoration of paleokarst landforms of Dengying Formation in Sichuan Basin and its geological significance. The 13th National Academic Conference on Palaeogeography and Sedimentology, 35]
- 柳娟. 2018. 冀中拗陷雾迷山组储层特征及综合评价. 中国石油大学(北京) 硕士学位论文: 9-53. [Liu J. 2018. Reservoir characteristics

and comprehensive evaluation of Wumishan Formation in Jizhong depression. Masteral dissertation of China University of Petroleum (Beijing): 9-53]

- 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. 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. 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]

- 聂跃平. 1994. 贵州中南部地区喀斯特地貌发育的趋势面分析. 南京大学学报(自然科学版), 30(1): 154-159. [Nie Y P. 1994. Analysis to the trend surface of Karst landform process in mid-southern Guizhou Province. Journal of Nanjing University (Natural Science Edition), 30(1): 154-159]

- 乔秀夫, 马丽芳. 1982. 华北地台中、晚、新元古代的地壳运动. 中国地质科学院地质研究所, 中国地质学会. 中国地质科学院地质研究所文集, (4): 1-14. [Qiao X F, Ma L F. 1982. The crustal movement of the North China platform in the Middle Proterozoic, Late Proterozoic and Neoproterozoic Era. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological sciences, Geological Society of China. Collected Works of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, (4): 1-14]

- 唐博宁, 朱传庆, 邱楠生, 崔悦, 郭飒飒, 陈驰. 2020. 雄安新区雾迷山组岩溶裂隙发育特征. 地质学报, 94(7): 2002-2012. [Tang B N, Zhu C Q, Qiu N S, Cui Y, Guo S S, Chen C. 2020. Characteristics of the karst thermal reservoir in the Wumishan Formation in the Xiong'an New Area. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2002-2012]

- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究. 中国地质, 44(6): 1074-1085. [Wang G L, Zhang W, Lin W J, Liu F, Zhu X, Liu Y G, Li J. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region. Geology in China, 44(6): 1074-1085]

- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 刘金侠, 胡秋韵, 苗青壮. 2018. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究. 地球学报, 39(5): 523-532. [Wu A M, Ma F, Wang G L, Liu J X, Hu Q Y, Miao Q Z. 2018. A Study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiong'an New Area. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 523-532]

- 杨明慧, 刘池洋, 孙冬胜, 崔永谦. 2002. 冀中拗陷的伸展构造系统及其构造背景. 大地构造与成矿学, 26(2): 113-120. [Yang M H, Liu C Y, Sun D S, Cui Y Q. 2002. Extensional tectonic system and its deep-seated setting of Jizhong Basin, China. Geotectonica Et Metallogenia, 26(2): 113-120]

- 杨明慧, 刘池洋, 杨斌谊. 2001. 冀中拗陷中生代构造变形的转换及油气. 大地构造与成矿学, 25(2): 113-119. [Yang M H, Liu C Y, Yang B Y. 2001. Tectonic transform of the Mesozoic and their re-



- lations to hydrocarbon traps in the Jizhong Basin, China. *Geotectonica Et Metallogenia*, 25(2): 113–119]
- 张以明, 常健, 刘念, 刘井旺, 马学峰, 赵淑芳, 沈芳宇, 周阳. 2017. 冀中坳陷霸县地区现今温压场及其与地热资源的关系. *天然气工业*, 37(10): 118–126. [Zhang Y M, Chang J, Liu N, Liu J W, Ma X F, Zhao S F, Shen F Y, Zhou Y. 2017. Present-day temperature-pressure field and its implications for the geothermal resources development in the Baxian area, Jizhong Depression of the Bohai Bay Basin. *Natural Gas Industry*, 37(10): 118–126]
- 赵国祥, 王清斌, 杨波, 王晓刚, 白冰, 万琳. 2016. 渤中凹陷奥陶系深埋环境下碳酸盐岩溶蚀成因分析. *天然气地球科学*, 27(1): 111–120. [Zhao G X, Wang Q B, Yang B, Wang X G, Bai B, Wan L. 2016. Dissolution mechanism analysis of Ordovician carbonates under burial environment of Bozhong sag, Bohai Sea area. *Natural Gas Geoscience*, 27(1): 111–120]
- 周瑞良. 1987. 华北平原北部深层地下水活动及其对地温场的影响. *中国地质科学院 562 综合大队集刊*, (6): 17–35. [Zhou R L. 1987. The activity of deep underground water in the northern part of the North China plain and its effect on the geothermal field. *Bulletin of the 562 Comprehensive Geological Brigade Chinese Academy of Geological Sciences*, (6): 17–35]
- Fridleifsson I B. 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 5(3): 299–312.
- Jiang H Y, Wang S X, Kang F X, Shi M, Fan Z H, Zhang L. 2019. Geological characteristics and resources potential of dry-hot pore ZKCW01 in Wendeng, Shandong Povince. *Acta Geologica Sinica*, 93(s1): 217–225.
- Li F, Li S L, Zeng J H, Liu J W, Liu J, Ge D W, Wang Y, Mu Y J. 2016. Feature of paleofluids and present fluids in the inner buried hill of Niutuozen uplift, Baxian sag. *Geoscience*, 30(5): 1115–1133.
- Ma X Y, Liu H F, Wang W X, Wang Y P. 1983. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China. *Acta Geologica Sinica*, (1): 24–34.
- Philip W C, Lloyd C P. 1970. Geologic Nomenclature and Classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin*, 54(2): 207–250.
- Qi J F, Yu F S, Lu K Z, Zhou J X, Wang Z Y, Yang Q. 2003. Conspectus on Mesozoic basins in Bohai bay province. *Earth Science Frontiers*, 10: 199–206.
- Sun A Q, Niu S Y. 2000. The mantle plume evolution and its geothermal effect—deep tectonic setting of geothermal anomaly in north China. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(2): 21–28.
- Yang H M, Dai J S, Wang B F, Juan Z. 2014. Developmemt process of Niutuozen uplift. *Journal of Northeast Petroleum University*, 38(6): 22–29.
- Zhu R X, Chen L, Wu F Y, Liu J L. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton. *Earth Science*. 54(6): 789–797.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐 杰)