

文章编号: 1671-1505(2025)04-0823-17 DOI: 10.7605/gdxb.2025.016

## 冀中坳陷中部中元古界雾迷山组热液活动特征\*

鲁 锴<sup>1</sup> 张 涛<sup>1</sup> 王哲麟<sup>1</sup> 鲍志东<sup>2,3</sup> 张军涛<sup>1</sup> 鲍逸非<sup>4</sup> 王启超<sup>1</sup>  
班舒悦<sup>2,3</sup> 郭妍晶<sup>2,3</sup> 胡小龙<sup>2,3</sup> 张辛雨<sup>2,3</sup>

1 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

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

4 北京邮电大学理学院, 北京 100876

**摘 要** 冀中坳陷中部中元古界雾迷山组中赋存着大量的油气和地热资源, 但目前对于雾迷山组储集层所经历的热液活动研究相对较少。本次研究在野外和岩心观察的基础上, 利用电子探针、碳氧稳定同位素、锶同位素和流体包裹体测温等手段, 对雾迷山组中热液活动特征及其对储集层的改造作用进行探讨。结果显示: 雾迷山组中发育多种热液相关矿物, 其热液活动可分为 3 类, 分别为慢源流体活动、以碳酸盐矿物为主的热液活动和硅质热液活动。其特征主要体现在白云岩发生大理岩化作用; 热液白云石矿物较基岩泥晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均偏负和锶同位素值升高; 一些白云石、石英和萤石胶结物中流体包裹体的均一温度异常增高。雾迷山组中热液活动强度的差异受控于区域慢源流体活动和输导通道。当研究区内断层和慢源流体活动时期相耦合时, 热液活动强度达到最大。其强度西北强于东南; 级别越高、规模越大的断层附近的热液活动越强的特征。热液活动产生的溶蚀作用、重结晶作用和水压力破裂作用对储集层有着建设性改造作用; 充填作用、胶结作用和硅化作用减少了储集空间, 是破坏性改造作用; 而大理岩化的过程基本没有改变原岩的储集性。

**关键词** 流体包裹体 热液活动 雾迷山组 潜山构造带 冀中坳陷**第一作者简介** 鲁锴, 男, 1990 年生, 博士, 副研究员, 主要从事碳酸盐岩沉积与储集层研究。E-mail: lukai.syky@sinopec.com。**通讯作者简介** 鲍志东, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事沉积学、储层地质学和油气与地热成藏与评价工作。E-mail: baozhd@cup.edu.cn。中图分类号: P588.24<sup>+</sup>5 文献标志码: ACharacteristics of hydrothermal activities in the Mesoproterozoic  
Wumishan Formation in central Jizhong DepressionLU Kai<sup>1</sup> ZHANG Tao<sup>1</sup> WANG Zhelin<sup>1</sup> BAO Zhidong<sup>2,3</sup> ZHANG Juntao<sup>1</sup> BAO Yifei<sup>4</sup> WANG Qichao<sup>1</sup>  
BAN Shuyue<sup>2,3</sup> GUO Yanjing<sup>2,3</sup> HU Xiaolong<sup>2,3</sup> ZHANG Xinyu<sup>2,3</sup>

1 Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 102206, 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

4 School of Sciences, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

\* 深地国家科技重大专项 (编号: 2024ZD1003600) 与中石化科技项目 (编号: P24063) 联合资助。[Co-funded by National Deep Underground Science and Technology Project and the Scientific (No. 2024ZD1003600) and Technological Projects of Sinopec (No. P24063)]

收稿日期: 2024-04-19 改回日期: 2024-09-26

**Abstract** The Mesoproterozoic Wumishan Formation in the central Jizhong Depression hosts abundant hydrocarbon and geothermal resources. However, studies on the hydrothermal processes affecting Wumishan reservoirs remain limited. Based on field and core observations, this study integrates electron microprobe analysis, carbon and oxygen stable isotope analysis, strontium isotope ratios, and fluid inclusion thermometry to investigate the characteristics of hydrothermal activity and its impacts on reservoir evolution within the Wumishan Formation. Results reveal the presence of diverse hydrothermal minerals, and the hydrothermal processes can be classified into three categories: (1) magmatic-related activity, (2) carbonate-dominated hydrothermal activity, and (3) siliceous hydrothermal activity. These are evidenced by dolomite undergoing marbleization, hydrothermal dolostones showing more negative  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values and higher  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios compared to matrix micritic dolomite, and anomalously elevated homogenization temperatures of fluid inclusions in dolomite, quartz, and fluorite cements. Variations in hydrothermal intensity are primarily controlled by regional magmatism and fluid migration pathways. Hydrothermal activity is strongest when faulting and magmatic events are temporally coupled, with greater intensity in the northwest compared to the southeast. More intense hydrothermal activity is also observed near higher-order, large-scale faults. Hydrothermal processes such as dissolution, recrystallization, and hydraulic fracturing enhance reservoir quality, while cementation, mineral filling, and silicification reduce porosity and act destructively. In contrast, marbleization has minimal influence on reservoir performance and largely preserves the original rock storage properties.

**Key words** fluid inclusion, hydrothermal activity, Wumishan Formation, buried hill structural belt, Jizhong Depression

**About the first author** LU Kai, born in 1990, Ph. D., is an associate research fellow. Now he is mainly engaged in researches of carbonate sedimentation and reservoirs. E-mail: lukai.syky@sinopec.com.

**About the corresponding author** BAO Zhidong, born in 1964, is a professor. He is mainly engaged in researches on sedimentology, reservoir geology and hydrocarbon and geothermal accumulation and evaluation. E-mail: baozhd@cup.edu.cn.

近年来,随着中国多个盆地的前寒武系古老碳酸盐岩中热液流体活动被不断发现,深部热液流体对古老碳酸盐岩储集层的改造作用受到了广泛关注(冯明友等,2016;马永生等,2023);有学者认为与构造断裂相关的富 $\text{CO}_2$ 酸性热液流体在沿断裂和裂缝运移时对围岩造成的溶蚀作用,是改善深部碳酸盐岩储集层物性的关键(王玉萍等,2014;韩俊等,2023)。也有学者认为热液流体虽然具有溶蚀改造作用,但随着温压条件改变和流动性减弱,热液会在裂缝和溶蚀孔洞中沉淀出特征矿物从而充填储集空间,进而使储集层物性变差(李双建等,2021;马尚伟等,2023)。前人研究成果显示中国沉积盆地中的热液流体主要是岩浆活动的产物(潘文庆等,2012;王良军等,2022;齐荣等,2024)。以中元古界蓟县系雾迷山组为主体的冀中坳陷中部潜山构造带经历了频繁的幔源流体活动,

并且雾迷山组中赋存着丰富的油气和地热资源(费宝生和汪建红,2005;罗宁等,2021)。但对于雾迷山组储集层的研究主要集中在储集层特征以及沉积相、单层厚度、构造作用和岩溶作用等对优质储集层发育和形成的控制等方面(余家仁等,1998;韩宝平,2000;张敏等,2008;鲁锴等,2019;Zhang *et al.*, 2019)。而关于雾迷山组在埋藏后所经历的热液活动及其对储集层的改造作用鲜有报道。因此,以岩石学、矿物学和地球化学等研究方法和理论为指导,综合利用野外剖面、钻井、薄片和室内分析化验等资料,对冀中坳陷中部深部热液活动特征进行研究,进而探讨其对古老碳酸盐岩储集层的影响。

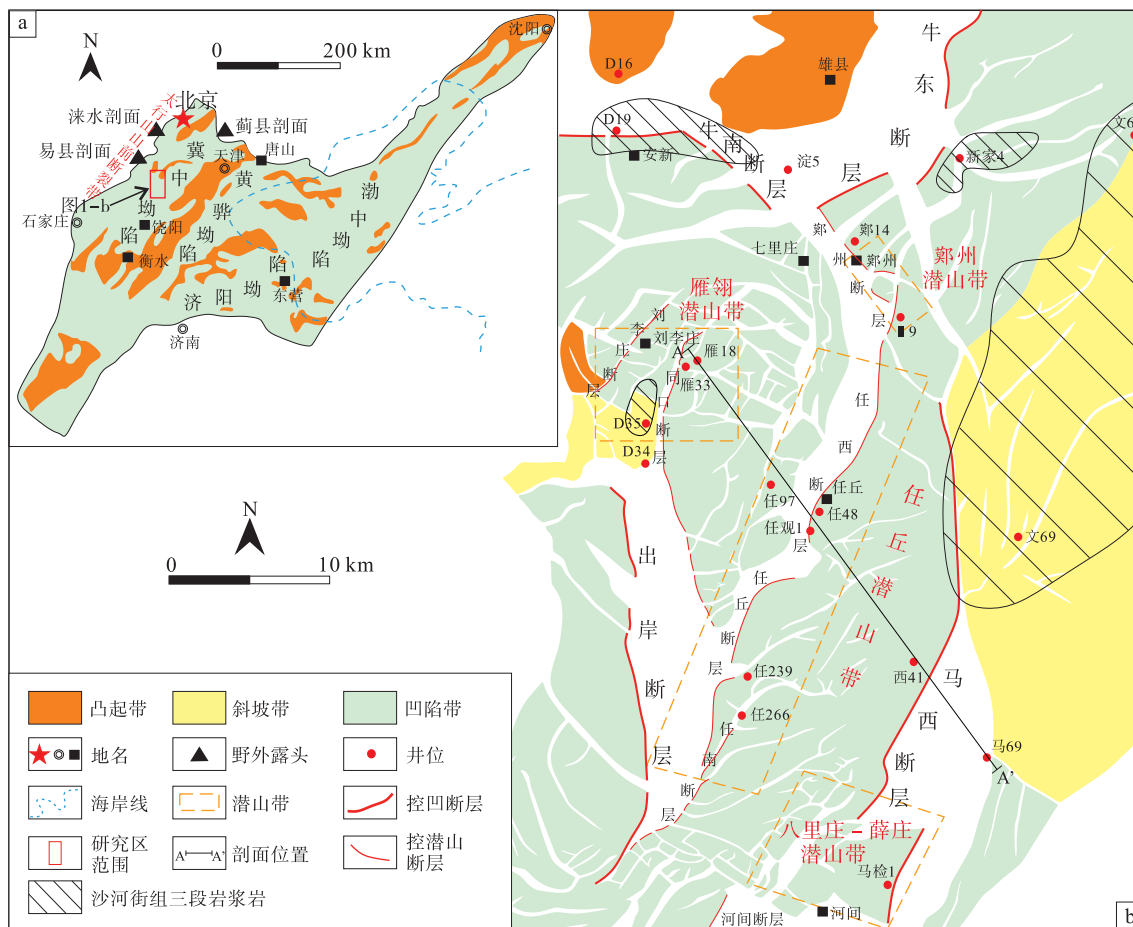
## 1 区域地质背景

冀中坳陷中部是指渤海湾盆地内次级构造单

元冀中拗陷的雄县至河间一带(图 1-a, 1-b)。构造位置属于中部断裂—潜山发育带, 构造格局整体呈北东向, 具有明显“凸、凹、断”相间的特征(图 1-b)。主要构造单元包括“两凸起两凹陷”, 分别为: 容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷、饶阳凹陷。其中在 2 个凹陷中分布 4 个潜山构造带, 分别为郑州、雁翎、任丘和八里庄—薛庄潜山带。区内主要断裂包括 NW-NNW 向的郑州断层和出岸断层; NE-NNE 向的牛东断层、刘李庄断层、任丘断层、任西断层、河间断层和马西断层等。

冀中拗陷中部在中生代经历了印支运动和燕山运动。印支运动一改中生代前的稳定升降的地台发育阶段, 以挤压褶皱为主, 使华北地台原本的 EW 向构造格局发生根本改变, 变为 NE、NNE 向展布的格局(图 2)。幔源流体活动主要发生在燕山运动时期和喜马拉雅运动时期。进入燕山期之后, 研究

区处于构造挤压状态, 发育大量 NE-SW 向、NNE-SW 向展布的逆断层和褶皱, 同时岩浆活动十分强烈, 此时经历了第 1 次热构造事件(任战利, 2000)。燕山运动中期, 华北地块开始由东西向破裂带活动转变为受 NNE 向破裂带活动控制, 同时火山活动持续剧烈。到了燕山运动晚期, 燕山隆起带以南地区, 受到 NE、NW 和近 EW 向断裂控制, 地块解体强烈, 形成了地堑型或箕状断陷盆地。华北地台岩浆火山活动大大减弱, 构造应力开始转变, 由挤压和挤压—剪切为主的动力状态转变为以拉张为主的伸展期。而喜马拉雅运动早期, 研究区基本继承了燕山期的构造格局, 在区域拉张的背景下, 进入强烈的断陷期。此时强烈的构造拉张所造成的一系列 NE 向的马西断层、牛东断层等深大断裂促使了强烈的岩浆活动, 并伴生了 NNE-SSW 向断层, 冀中拗陷中部经历了第 2 次岩浆事件



a—研究区在渤海湾盆地中位置; b—冀中拗陷中部雾迷山组顶面构造单元图

图 1 冀中拗陷中部区域位置及构造简图(据劳海港等, 2010; 孙文亮, 2010; 吴孔友等, 2010; 毛黎光, 2014; 有修改)

Fig. 1 Regional location and structural sketch of central Jizhong Depression (modified from Lao *et al.*, 2010; Sun, 2010; Wu *et al.*, 2010; Mao, 2014)

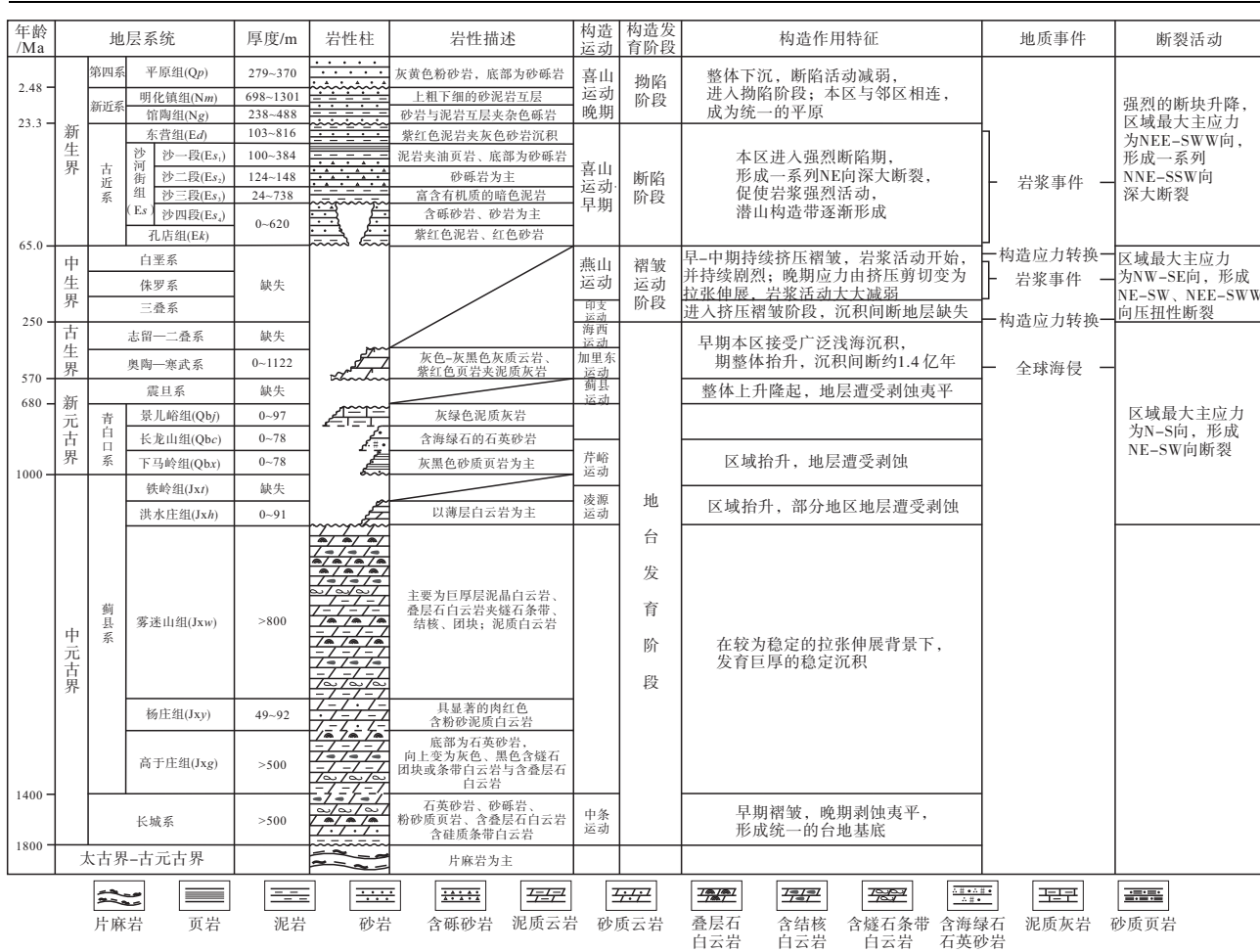


图 2 冀中拗陷中部构造—地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive histogram of tectonics-strata of central Jizhong Depression

(图 2), 区内 D12、D19、D35 和文 69 等钻井揭露了玄武岩、闪长玢岩等古近系沙河街组三段的岩浆岩体 (王思琪等, 2021)。同时, 伴随断块的差异升降和倾斜, 各个潜山构造带逐渐开始成型。

任丘潜山的形成受控于马西断层和任西断层, 在二者共同的反向掀斜作用下, 其之间的地层发生旋转错断, 从而形成现今“西高东低”的任丘潜山形态 (崔树清, 2009; 何登发等, 2017)。雁翎潜山带的形成则受控于刘李庄断层, 该断层将中生代就已形成的雁翎背斜改造为错断翘倾的潜山形态。郑州潜山为受郑州断层控制的单断山 (劳海港, 2010)。八里庄—薛庄潜山构造带是由河间断层和马西断层所形成的断块山组成 (吴孔友等, 2010)。冀中拗陷中部基底为太古宇—古元古界变质结晶岩系, 上覆地层为长城系、蓟县系和新生界。青白口系、古生界和中生界保存不全, 仅在局部分布 (图 2); 潜山内幕地层以雾迷山组为主, 并

直接与上覆古近系不整合接触 (图 3)。雾迷山组为 1 套巨厚的陆表海沉积, 主要岩性有泥晶白云岩、叠层石白云岩、含燧石条带白云岩等 (鲍志东等, 2019; 鲁锴等, 2023)。

## 2 样品采集与测试

本次研究涉及冀中拗陷中部及周边的 3 条剖面和 16 口钻井, 雾迷山组岩石样品采自涑水剖面、淀 5 井、雁 33 井、任 266 井和郑 14 井。样品采集点涵盖盆缘造山带、盆内断裂带、潜山带和凹陷带, 旨在将不同构造部位样品分析结果进行对比, 探究雾迷山组中热液活动的差异。样品碳、氧同位素、阴极发光分析在中国石油大学 (北京) 完成。碳、氧同位素仪器为 Elementar Isoflow-Precision 稳定同位素质谱仪。阴极发光仪器型号为 CL8200 MK5-2 阴极发光仪, 连接 Leica DM2 500 显微镜对

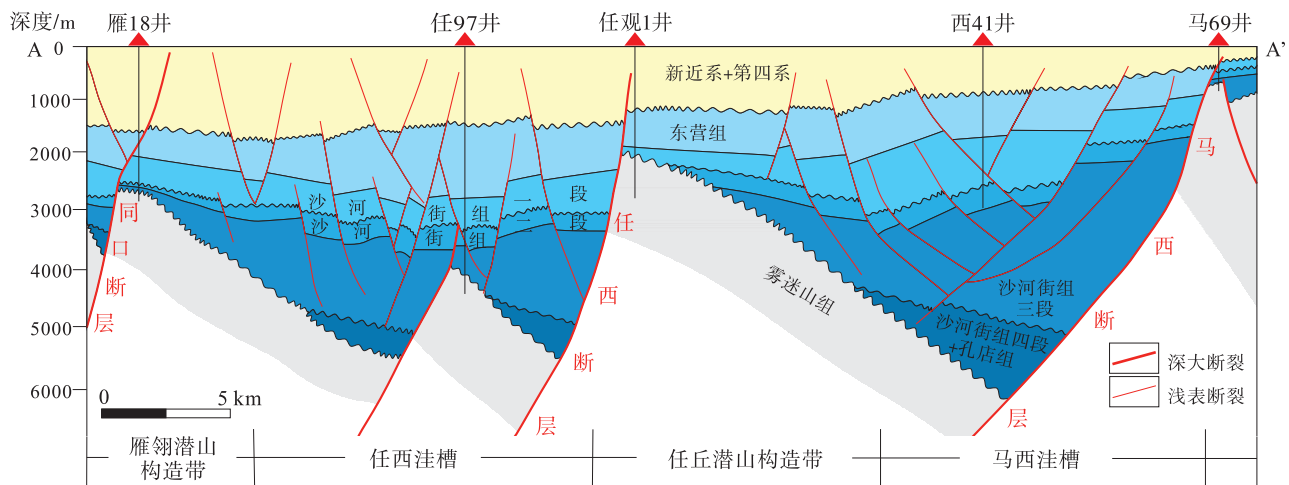


图 3 冀中拗陷中部地层剖面图 (据易士威等, 2010; 有修改)

Fig. 3 Strata section of central Jizhong Depression (modified from Yi *et al.*, 2010)

岩石薄片进行分析。电子探针分析在中国地质科学院成矿作用与资源评价重点实验室完成。仪器型号为 JXA-8230, 配有 X 射线显微分析系统仪 EDS, 对矿物成分进行分析。

锶同位素、流体包裹体测温分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。锶同位素测定仪器为 Phoenix 热表面电离质谱仪。流体包裹体测温的显微冷台型号为 LINKAM THMS600, 温度范围为  $-196 \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 升温速率为  $0.1 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 对温度的测量具有高精度 (全程  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和高稳定性 ( $<0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。

### 3 热液活动证据及特征

#### 3.1 岩石学证据及特征

热液通常是指比周围岩层温度环境高至少  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的流体 (White, 1957; Machel and Lonner, 2002; Smith and Davies, 2006), 热液的来源可以直接是岩浆, 也可以是基于岩浆加热的地层流体 (李红等, 2021; 王良军等, 2022), 其运移通道为断裂和裂缝。从深部沿断裂向上运移的热液流体通常富含酸性, 对于所经过的可溶围岩有着溶蚀作用 (Davies and Smith, 2006)。冀中拗陷中部雾迷山组热液在进入地层后通过水-岩反应, 将原岩的颜色、结构、成分和构造等方面发生变化 (金之钧等, 2006), 产生热液矿物的交代和充填产物。通过宏观和微观相结合的岩石学观测手段发现, 雾迷山组热液活动可表现为 3 大类, 分别为幔源流体活

动、以碳酸盐矿物为主的热液活动和硅质热液活动。由于研究区地处华北平原, 区内无野外剖面, 因此本次研究选取研究区西北部  $30\text{ km}$  的易县剖面、 $45\text{ km}$  的涞水剖面以及东北部  $120\text{ km}$  的蓟县剖面, 结合区内钻井取心, 对雾迷山组中热液活动特征进行探究 (图 1-a)。

野外踏勘和岩心观察发现, 雾迷山组岩浆活动在宏观上可表现为对局部白云岩发生大理岩化作用和雾迷山组中可见发育的岩浆岩。前人对于雾迷山组白云岩被大理岩化现象的记录主要集中于雾迷山组下部, 其中最著名的大理岩化现象为河北涞源白石山雾迷山组一段受燕山岩浆侵入影响形成的含燧石条带白云石大理岩峰林 (聂泽同等, 2002; 安广义等, 2005)。白云岩与岩浆直接接触从而发生热变质作用, 在野外可见到丘状叠层石白云岩中, 叠层结构由于具有良好的孔渗性, 岩浆可以侵入其中, 在叠层结构处发生大理岩化, 使原本灰色白云岩变为白色大理岩, 与围岩相比具有明显不同 (图 4-a)。在毗邻断裂的钻井揭露了雾迷山组中发育的玄武岩和闪长玢岩等岩浆岩 (图 4-d), 也直接说明了岩浆活动的存在。以碳酸盐矿物为主的热液主要是由岩浆提供热源的热液形成。在宏观上, 以碳酸盐矿物为主的热液活动主要表现为在雾迷山组白云岩孔洞和裂缝中可见被白色细—粗晶白云石胶结物充填—半充填的特征 (图 4-b, 4-e, 4-f)。而硅质热液同样是由岩浆提供热源的热液, 其活动在宏观上可表现为硅质热液对基岩溶蚀后在溶蚀孔洞和裂缝中充填—半充填的硅质胶结物



a—丘状叠层石白云岩，具有叠层结构的部分直接接触岩浆被大理岩化（见箭头），围岩部分仍是白云岩，雾迷山组，白石山剖面；b—深灰色块状泥晶白云岩发育溶孔，溶孔被白色白云石晶体充填一半充填（见箭头），雾迷山组，易县剖面；c—灰色白云岩被热液溶蚀的孔洞，洞壁上可见硅质胶结物和洁净石英晶体（见箭头），雾迷山组，蓟县剖面；d—玄武岩，侵入于雾迷山组中，D13井，雾迷山组，1501.43 m，岩心；e—灰色泥晶白云岩，溶孔中可见生长的白云石晶体（见箭头），D11井，雾迷山组，873.41 m，岩心；f—图 4-e 的局部放大；g—灰色粉晶白云岩，发育硅质发育白色硅质团块（见箭头），马检 1 井，雾迷山组，2597.09 m，岩心；h—角砾白云岩，白云岩角砾被蚀变为暗红色，角砾间充填黑色沥青质（见箭头），雁 33 井，雾迷山组，2879.5 m，岩心；i—角砾白云岩，白云岩角砾被蚀变为黄色—深红色，郑 9 井，雾迷山组，4180.15 m，岩心

图 4 冀中拗陷中部雾迷山组热液活动标志的宏观特征

Fig. 4 Macroscopic characteristics of evidences of hydrothermal activities of the Wumishan Formation in central Jizhong Depression

(图 4-c) 以及对基岩硅化形成的硅质团块等 (图 4-g)。另外，热液流体通常具有较高的流体压力，深部上涌产生的水压力破裂作用造成岩石破碎，形成大小不一的角砾 (Davies and Smith, 2006; Katz *et al.*, 2006)，在宏观上表现出角砾间被硅质和沥青质充填 (图 4-h, 4-i)，同时，部分角砾有热褪色的结构特征，颜色由原先的灰色变为淡红色—黄色等 (图 4-h, 4-i)。

基于岩石薄片和阴极发光等分析结果，岩浆活动使雾迷山组白云岩发生大理岩化的微观特征主要

为原岩白云岩颗粒蚀变为大理岩颗粒，其中发育较好的颗粒可呈近六边形的嵌晶状结构 (图 5-a)。以碳酸盐矿物为主的热液活动在雾迷山组微观上主要表现为原始雾迷山组白云岩结构被破坏，由原本的泥晶变为细—中晶，并伴晶间孔或晶间溶孔发育，孔隙间常见沥青充填一半充填 (图 5-b)。同时，在溶蚀孔洞中充填的胶结物多以鞍状白云石和较自形的中—粗晶白云石为主，并与少量石英伴生 (图 5-c, 5-d, 5-e)。鞍状白云岩具有晶面弯曲，在正交偏光下波状消光的特征 (图 5-c)。而较自

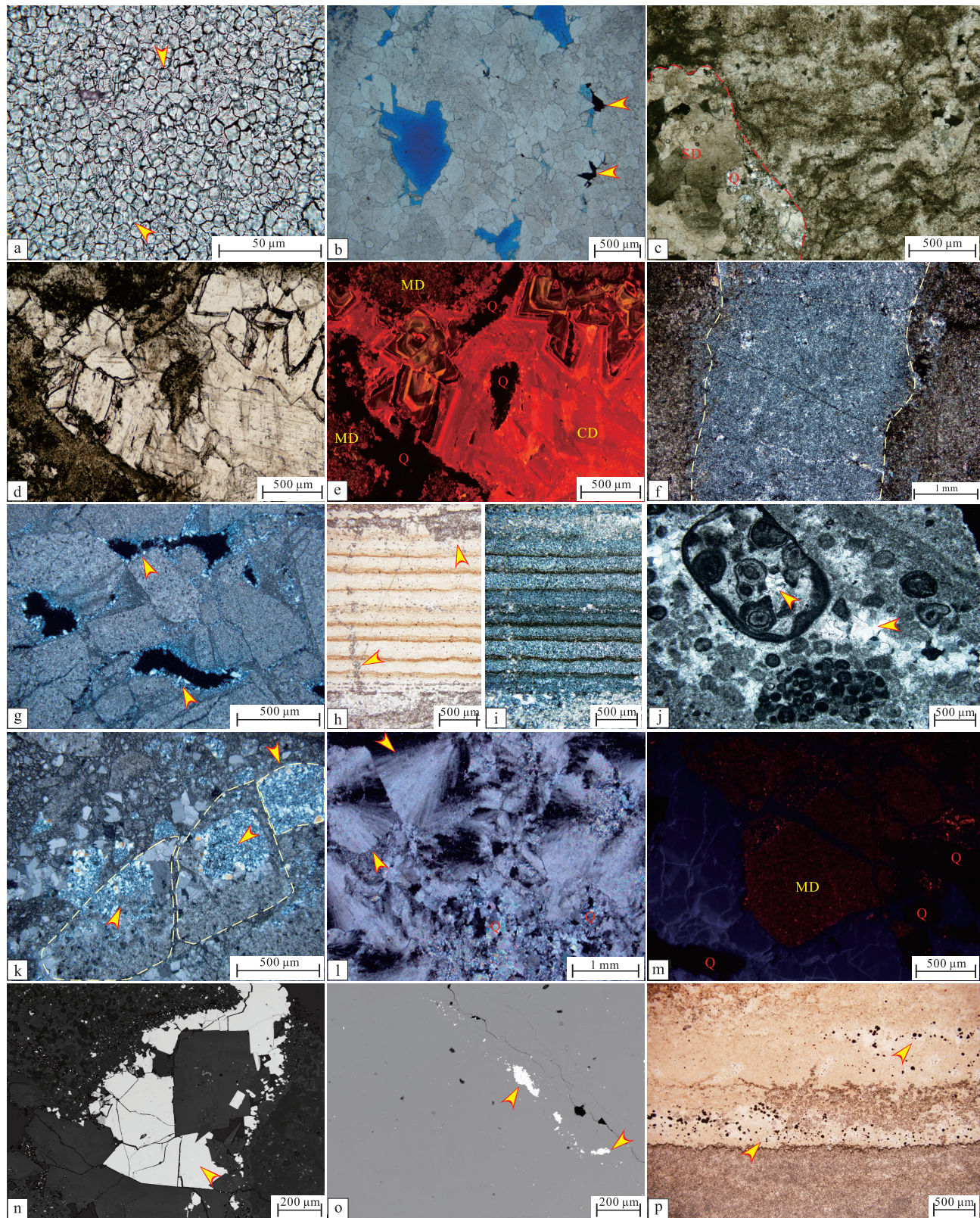


图 5 冀中坳陷中部雾迷山组热液活动标志的微观特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of evidences of hydrothermal activities of the Wumishan Formation in central Jizhong Depression

图 5 说明:

a—微晶大理岩, 近似六边形晶体嵌晶状结构 (见箭头), 次生孔隙不发育, 雾迷山组, 蓟县剖面, 单偏光; b—细晶白云岩, 晶间孔发育被沥青质充填一半充填 (见箭头), 雁 33 井, 雾迷山组, 井深 2852 m, 铸体薄片, 单偏光; c—叠层石白云岩, 溶蚀孔洞 (红色虚线) 中充填鞍状白云石 (SD), 波状消光特征, 并与石英 (Q) 伴生; 雾迷山组, 蓟县剖面, 正交光; d—细—中晶半自形—自形白云石充填物, 白云石边缘和中部可见隐晶硅质充填, 雾迷山组, 涑水剖面, 单偏光; e—与 d 同一视域阴极发光特征, 自形—半自形的中—粗晶白云石 (CD) 发橘黄—红的亮光, 基质白云岩 (MD) 发暗红色光, 硅质胶结物 (Q) 不发光; f—泥晶白云岩, 可见硅质热液通道 (见黄色虚线), 雾迷山组, 涑水剖面; g—角砾白云岩, 角砾间被硅质热液溶蚀扩大并被硅质充填一半充填 (见箭头), 部分角砾具有被硅化的特征, 高深 1 井, 雾迷山组, 井深 3097.8 m, 铸体薄片, 正交光; h—硅质白云岩, 水平纹层被热液硅化, 残留白云石晶粒 (见箭头), 雾迷山组, 蓟县剖面, 单偏光; i—硅质白云岩, 与 h 同一视域, 正交光; j—鲕粒白云岩, 鲕粒间与鲕粒内部白云石胶结物被硅化 (见箭头), 雁 33 井, 雾迷山组, 井深 2902.4 m, 正交光; k—角砾白云岩, 角砾 (见黄色虚线) 具有部分或全部被硅化的特征 (见箭头), 高深 1 井, 雾迷山组, 井深 3752.7 m, 正交光; l—经过高温烘烤的球粒白云岩, 球粒被热液溶蚀后具有放射—波状消光特征, 任 239 井, 雾迷山组, 井深 3105.94 m, 正交光; m—角砾白云岩, 角砾间被萤石充填, 在阴极发光下发蓝色光, 基质白云岩 (MD) 发暗红色光, 硅质胶结物 (Q) 不发光, 郑 14 井, 雾迷山组, 井深 4976.8 m, 岩心; n—鲕粒白云岩, 溶蚀孔洞中被热液萤石充填 (见箭头), 具体元素含量见表 1, 郑 9 井, 井深 4221.2 m, 雾迷山组, 电子探针照片; o—泥晶白云岩, 白云石基质中溶孔被热液重晶石充填 (见箭头), 具体元素含量见表 1, 任 48 井, 井深 2707.5 m, 雾迷山组, 电子探针照片; p—硅质白云岩, 黄铁矿呈带状分布 (见箭头), D14 井, 井深 1383.5 m, 雾迷山组, 单偏光

表 1 冀中坳陷中部雾迷山组热液矿物电子探针分析结果

Table 1 Results of electronic probe analysis of hydrothermal minerals of the Wumishan Formation in central Jizhong Depression

井号	深度/m	元素含量/%							岩性
		F	Si	Ca	S	Ba	其他元素	总量	
雁 33	2907.1	0.02	95.34	0.39	0.00	0.03	0.52	96.29	石英
郑 9	4221.2	48.94	0.03	70.90	0.00	0.00	0.24	99.51	萤石
郑 9	4221.2	48.17	0.10	70.92	0.00	0.02	0.31	99.24	萤石
郑 9	4221.2	48.23	0.05	71.24	0.00	0.00	0.14	99.34	萤石
雁 33	2879.1	48.31	0.02	71.59	0.00	0.00	0.13	100.14	萤石
雁 33	2879.1	0.00	0.02	0.01	34.60	65.62	0.39	100.64	重晶石
任 48	2707.5	0.00	0.12	0.18	33.88	65.33	0.56	100.07	重晶石
高深 1	3501.6	0.05	96.94	0.17	0.01	0.00	0.87	98.04	石英

注: 其他元素包括 Na, Mg, P, Pb, K, Zr, Cl, Ti 等。

形的中—粗晶白云石晶面较平直, 不具有波状消光特征 (图 5-d), 在阴极发光下发橘黄—红的亮光, 与发暗红色光的基质白云岩和不发光的硅质胶结物具有明显区别 (图 5-e), 说明了其在埋藏环境下受到热液改造作用 (黄思静等, 2008)。而研究区硅质热液在雾迷山组中活动的微观特征主要表现为沿裂缝或孔洞等通道对周围的原岩进行硅化或溶蚀, 在缝壁或孔洞壁上可见硅质胶结物充填一半充填 (图 5-f, 5-g)。硅质热液对原岩的硅化可表现为: (1) 原本的白云岩泥晶结构被蚀变为微晶石英, 但原本的沉积构造 (例如纹层, 颗粒等) 被保留, 在微晶石英中仍可见泥晶白云石残留 (图 5-h, 5-i); (2) 原本颗粒 (如鲕粒、复鲕、核形石等) 之间或内部的碳酸盐胶结物被蚀变为硅质胶结物, 而有机质含量较高的黑色同心层没有被硅化

(图 5-j); (3) 由硅质热液沿断裂和裂缝系统上涌而引起的水压力破裂作用造成的原岩破裂, 从而形成的角砾状白云岩中可见白云石角砾被局部或全部硅化的特征 (图 5-k)。另外, 在雾迷山组白云岩中常见整体结构以泥晶白云石为主的似球粒, 部分具有同心层结构, 但均不具有明显核心。其尺寸主要在几百微米至 2 mm 之间, 颗粒间通常被硅质胶结物充填。这种似球粒及其碎片在正交偏光下均具有放射状或波状消光特征 (图 5-l), 可能是由于原始球粒结构被硅质热液烘烤后发生弯曲变形而造成的。由电子探针分析结果可知 (表 1), 除了上述的微晶石英和鞍状白云石等矿物外, 在由埋藏岩溶所形成的溶孔、溶洞中充填着热液伴生矿物 (图 5-m, 5-n, 5-o), 如黄铁矿、重晶石和萤石等, 并且黄铁矿常呈带状分布 (图 5-p), 证明了热液流

表 2 冀中拗陷中部雾迷山组热液活动标志特征对比

Table 2 Comparison of hydrothermal activity characteristics of the Wumishan Formation in central Jizhong Depression

类型	热源	宏观特征	微观特征	其他特征
幔源流体	地幔	区内钻遇岩浆岩、野外可见幔源流体与雾迷山组白云岩直接接触,发生热变质作用,使局部白云岩变质为大理岩	白云岩颗粒蚀变为大理岩颗粒,其中发育较好的颗粒可呈近六边形的嵌晶状结构	
以碳酸盐矿物为主的热液	岩浆提热	野外剖面和岩心中可见雾迷山组白云岩孔洞和裂缝被白色细—中晶白云石胶结物充填—半充填	镜下可见泥晶白云岩重结晶作用,并伴晶间孔或晶间溶孔发育。同时,在溶蚀孔洞中充填的胶结物多以鞍状白云石和较自形的中—粗晶白云石为主。鞍状白云岩具有晶面弯曲,在正交偏光下波状消光的特征。而较自形的中—粗晶白云石晶面较平直,不具有波状消光特征,在阴极发光下发橘黄—红的亮光	镜下可见溶孔、溶洞中充填着热液伴生矿物,如黄铁矿、重晶石和萤石等,并且黄铁矿常呈带状分布,证明了热液流体的注入
硅质热液	岩浆提热	野外剖面和岩心可见雾迷山组溶蚀孔洞和裂缝中充填—半充填的硅质胶结物和硅化形成的硅质团块等,水压力破裂作用造成的角砾并且部分角砾有热褪色的结构特征,颜色由灰色变为淡红色—黄色等	沿裂缝或孔洞等通道对周围的原岩进行硅化或溶蚀,在缝壁或孔洞壁上可见硅质胶结物充填—半充填。雾迷山组中似球粒结构在正交偏光下具有波状消光特征,可能是由于原始球粒结构被硅质热液烘烤后发生弯曲变形而造成的	

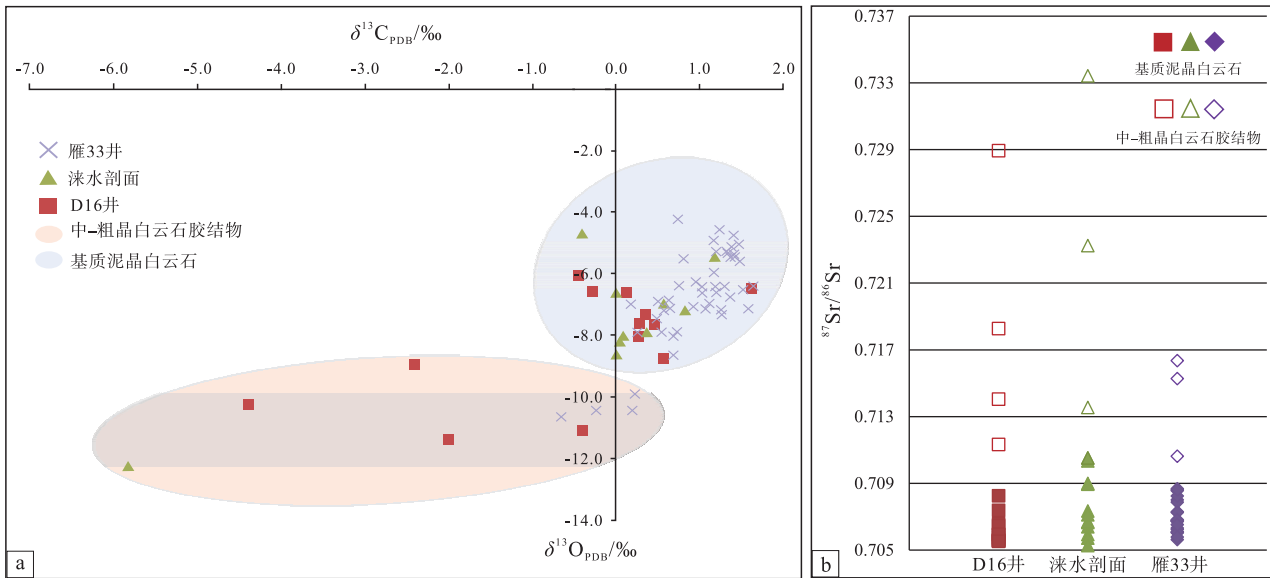
体的注入,是典型热液活动的特征(表 2)。

### 3.2 地球化学证据及特征

#### 3.2.1 碳、氧同位素特征

通过对雾迷山组野外剖面和岩心的中基质泥晶白云岩和中—粗晶白云石胶结物样品进行地球化学分析,结果显示:两者的碳、氧同位素平均值和分布范围差别较大,具有较好的区分性(图 6-a),基岩泥晶白云石  $\delta^{13}C$  在  $-0.4\text{‰} \sim 1.6\text{‰}$  之间变化,

平均值为  $0.8\text{‰}$ ;  $\delta^{18}O$  值范围为  $-8.8\text{‰} \sim -4.2\text{‰}$ ,平均值为  $-6.6\text{‰}$ 。中—粗晶白云石的  $\delta^{13}C$  在  $-5.8\text{‰} \sim 0.2\text{‰}$  之间波动,平均值为  $-1.7\text{‰}$ ;  $\delta^{18}O$  的值范围为  $-12.2\text{‰} \sim -8.9\text{‰}$ ,平均值为  $-10.6\text{‰}$ 。前人在冀中拗陷北部地区的工作显示,北京十三陵地区雾迷山组  $\delta^{13}C$  值在  $-1.5\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$  之间,  $\delta^{18}O$  数值范围大多为  $-4\text{‰} \sim -5\text{‰}$  (李任伟等, 1999); 天津蓟县剖面雾迷山组  $\delta^{13}C$  数值落在  $-2.3\text{‰} \sim 2.3\text{‰}$  之间,  $\delta^{18}O$  值的变化范围为  $-8.8\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$  (储雪蕾等,



a—雾迷山组碳、氧同位素特征; b—雾迷山组锶同位素特征

图 6 冀中拗陷中部雾迷山组热液活动地球化学特征

Fig. 6 Geochemical characteristics of hydrothermal activities of the Wumishan Formation in central Jizhong Depression

2003; 田辉等, 2021); 而燕山地区蓟县系 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围在 $-2.5\text{‰} \sim 1.8\text{‰}$ 之间,  $\delta^{18}\text{O}$ 数值范围大多在 $-6\text{‰} \sim -9\text{‰}$ 之间 (Guo *et al.*, 2013); 其中雾迷山组 $\delta^{13}\text{C}$ 值落在 $-1.53\text{‰} \sim 1.56\text{‰}$ 之间,  $\delta^{18}\text{O}$ 数值范围为 $-2\text{‰} \sim -8\text{‰}$  (旷红伟等, 2009)。此次研究对基岩泥晶白云石的碳、氧同位素测定结果与上述作者的测定结果基本吻合。

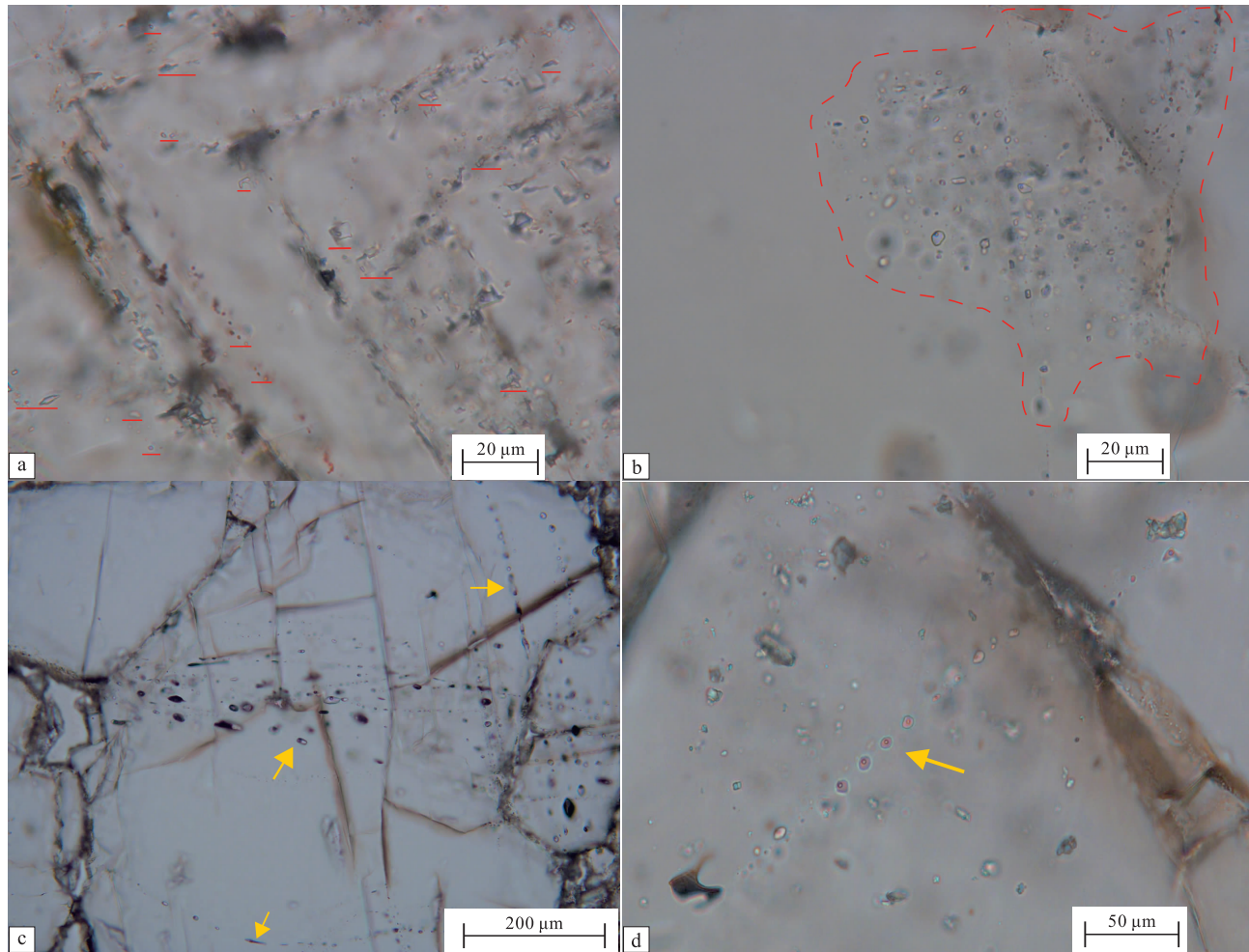
### 3.2.2 锶同位素

由雾迷山组野外剖面和岩心样品的锶同位素测定结果可知(图 6-b): 去除涞水剖面样品存在 1 个高值 ( $>0.7090$ ) 外, 基质泥晶白云石样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均在 $0.7050 \sim 0.7090$ 之间, 属正常范围, 平均值为 $0.7068$ , 与李华芹等 (1994) 所测得蓟

县剖面雾迷山组 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 $0.7072$ 近似。而中一粗晶白云石胶结物样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 $0.7100 \sim 0.7340$ 之间, 平均值为 $0.7178$ , 明显高于基质泥晶白云石的锶同位素比值。

### 3.2.3 流体包裹体均一化温度

流体包裹体是对原始流体的直接记录, 其均一化温度可以直接反映出矿物生长的温度下限 (Allan and Wiggins, 1993)。据流体包裹体观察显示, 在孔洞和裂缝中充填的白云石、石英和萤石 3 类胶结物中均可见到成群分布或成带状分布的流体包裹体。包裹体类型主要包括盐水包裹体和含天然气盐水包裹体 2 类, 主要分布在矿物内部和边部。白云石中包裹体较为发育, 主要为成群分布的无色—浅



a—孔洞中的中—细晶白云石, 成群发育的透明无色盐水包裹体(见红色线), 雁 33 井, 井深 2901.4 m, 雾迷山组, 单偏光; b—孔洞石英矿物中成群分布、呈透明无色的盐水包裹体(红色虚线), 任 266 井, 井深 3221.9 m, 雾迷山组, 单偏光; c—孔洞萤石矿物中沿微裂隙面成带状分布、呈无色—浅灰色的盐水包裹体与呈深灰色的天然气包裹体(见箭头), 郑 14 井, 雾迷山组, 井深 4976.4 m, 单偏光; d—孔洞中萤石矿物内成带状分布、无色透明的盐水包裹体(见箭头), 任 266 井, 井深 3174.4 m, 雾迷山组, 单偏光

图 7 冀中拗陷中部雾迷山组流体包裹体特征

Fig. 7 Characteristics of fluid inclusions of the Wumishan Formation in central Jizhong Depression

灰色的盐水包裹体，局部可见深灰色的天然气包裹体，大小在  $1\sim 12\ \mu\text{m}$  之间(图 7-a)，石英中的包裹体以成群分布的无色透明盐水包裹体为主，大小在  $1\sim 10\ \mu\text{m}$  之间(图 7-b)，萤石中包裹体以成带分布的无色透明盐水包裹体为主，其次为呈深灰色的天然气包裹体，大小在  $1\sim 20\ \mu\text{m}$  之间(图 7-c, 7-d)。

分别对涑水剖面雾迷山组 2 个样品中 58 个流体包裹体和研究区内淀 5 井、雁 33 井、任 266 井和郑 14 井的 9 个雾迷山组岩心样品中 168 个流体包裹体的均一化温度进行测试，结果显示：涑水剖面雾迷山组样品温度数据较高，在  $123\sim 221\ ^\circ\text{C}$  之间，平均值为  $172.9\ ^\circ\text{C}$ ，可分为 3 个峰值，分别为  $138\sim 153\ ^\circ\text{C}$ ； $168\sim 183\ ^\circ\text{C}$  和  $203\sim 218\ ^\circ\text{C}$ 。而区内雾迷山组岩心样品温度较剖面样品有所降低，温度范围为  $70\sim 139\ ^\circ\text{C}$ ，平均值为  $108.1\ ^\circ\text{C}$ ，具有 2 个峰值，分别为  $95\sim 110\ ^\circ\text{C}$  和  $115\sim 130\ ^\circ\text{C}$ 。

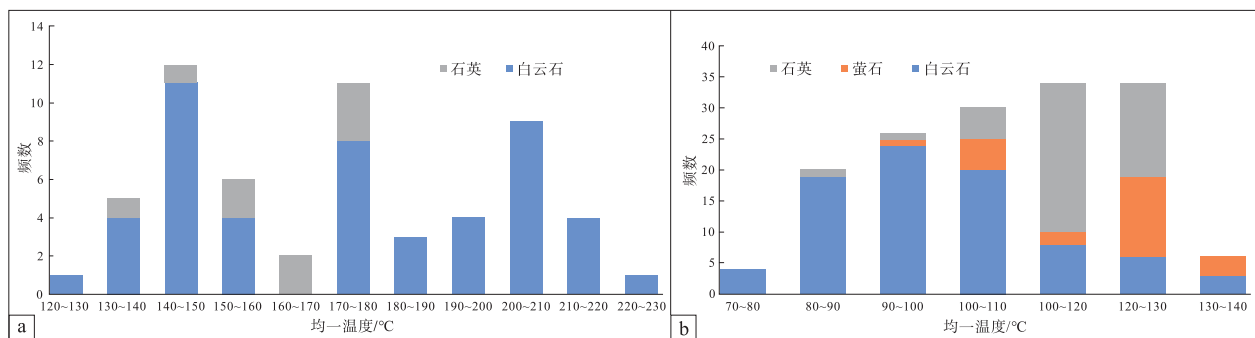
涑水剖面雾迷山组白云石胶结物中包裹体共有测温点 49 个，温度范围为  $123\sim 221\ ^\circ\text{C}$ ，平均值为  $175.2\ ^\circ\text{C}$ ；石英胶结物中包裹体共测温 9 个，温度分布在  $135\sim 176\ ^\circ\text{C}$  之间，平均温度为  $160.3\ ^\circ\text{C}$  (图 8-a)。而雾迷山组钻井岩心样品中白云石胶结物共有测温点 84 个，温度范围在  $70\sim 139\ ^\circ\text{C}$  之间，平均值  $99.6\ ^\circ\text{C}$ 。石英中的包裹体测温点 46 个，温度范围在  $87\sim 128\ ^\circ\text{C}$  之间，平均值  $117.3\ ^\circ\text{C}$ 。萤石中包裹体测温点 24 个，温度范围在  $96\sim 132\ ^\circ\text{C}$  之间，平均值  $121.5\ ^\circ\text{C}$  (图 8-b)。

## 4 讨论

### 4.1 热液活动的产物

冀中拗陷中部雾迷山组中热液活动频繁，3 类

热液具有各自独特的产物。首先源自地幔的岩浆在雾迷山组中造成接触热变质作用，将白云岩变质为大理岩，并发育玄武岩和闪长玢岩等岩浆岩。其次，以岩浆为热源的含碳酸盐矿物热液，通常使原本雾迷山组泥晶白云石发生重结晶作用，使其晶粒变大，并在雾迷山组中的孔洞和裂缝中形成中一粗晶白云石和鞍状白云石胶结物。而中一粗晶白云石胶结物的碳、氧同位素值，特别是氧同位素值，较基岩泥晶白云石具有明显偏负的特征(图 6-a)。虽然受大气淡水影响，也可造成白云石的碳、氧同位素具有相似负偏特征，但在大气淡水环境下，难以形成中一粗晶白云石胶结物。并且，中一粗晶白云石胶结物样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值明显高于基质泥晶白云石的锶同位素比值(图 6-b)，与区域上五台山—恒山的燕山期侵入岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7062\sim 0.7103$  和太行山南段燕山期侵入岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7062\sim 0.7068$  相比(祁凯, 2021)，雾迷山组中一粗晶白云石胶结物样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值同样明显升高。说明幔源热液没有与白云岩直接接触，中一粗晶白云石胶结物是由岩浆提供热源的热液流体流经雾迷山组下伏碎屑沉积物及基底岩石并与其相互作用(李双建等, 2021)，进而参与胶结物的形成，最终使白云石胶结物中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值升高。另外，由各矿物中流体包裹体温度直方图可知(图 8-a)：涑水剖面雾迷山组白云石胶结物大多形成于较高的温度环境( $> 120\ ^\circ\text{C}$ )，其流体包裹体的均一温度所具有 3 个峰值 ( $140\sim 150\ ^\circ\text{C}$ ,  $n=11$ ； $170\sim 180\ ^\circ\text{C}$ ,  $n=8$ ； $200\sim 210\ ^\circ\text{C}$ ,  $n=9$ )，反映了涑水剖面所位于的太行山隆起区自中生代以来所经历的多期岩浆活动。因此，由 3 种测试结果显示，中粗晶白云石胶结物的形成受到了后期重结晶或热液流体的影响。最



a—涑水剖面雾迷山组不同胶结物中流体包裹体均一温度分布；b—冀中拗陷中部雾迷山组岩心不同胶结物中流体包裹体均一温度分布

图 8 冀中拗陷中部雾迷山组流体包裹体均一温度分布特征

Fig. 8 Homogenization temperature distribution of fluid inclusions of the Wumishan Formation in central Jizhong Depression

后, 硅质热液为雾迷山组带来了丰富的硅质来源, 其中常见形态各异的硅质胶结物。同时, 与以碳酸盐矿物为主的热液一同带来了黄铁矿、重晶石和萤石等热液伴生矿物沉淀。石英中流体包裹体均一温度多高于 110 °C, 主峰位于 110~120 °C 之间。萤石中流体包裹体均一温度主要高于 120 °C, 主峰位于 120~130 °C 之间(图 8-b)。

此外, 对于冀中拗陷中部是否存在地热流体活动也可以通过对矿化流体的温度与地层经历的温度进行对比。依据埋藏—热演化史可知(李静和查明, 2010; 陈清华等, 2013), 现今雾迷山组正处于其最大埋深, 因此现今地层温度是其正常经历的最高温度。地温随深度增加而增大, 但地温梯度有明显的分带性, 上部新生界碎屑岩盖层地温梯度较高, 均值在 3 °C/hm 以上, 下部碳酸盐岩、硅质岩等梯度在 2 °C/hm 左右(曹瑛倬等, 2021; 王思琪等, 2021)。例如, 任丘潜山带的任 23 井地温梯度: 新近系 3.13 °C/hm; 古近系 3.40~3.75 °C/hm; 雾迷山组为 0.95~1.90 °C/hm。高阳低凸起的 D35 井和雁翎潜山南部 D34 井的地温梯度: 新生界约为 2.5 °C/hm, 蓟县系约为 1.0 °C/hm。同时, 不同构造单元内的盖层厚度和雾迷山组埋深具有较大差异, 因此在前人成果的基础上, 结合研究区实际综合考量, 取 3 °C/hm 为新生界平均地温梯度; 1.5 °C/hm 为雾迷山组平均地温梯度; 15 °C 为恒温层平均温度对各构造单元的雾迷山组地层温度进行分别计算, 结果显示(表 3): 样品中 12.5% 的萤石胶结物、26.2% 的白云石胶结

物和 87.0% 的石英胶结物形成于高于正常地温的热液环境中。包裹体盐度测试表明热液成因的萤石胶结物流体平均盐度为 10.1%; 白云石胶结物的流体平均盐度为 19.1%; 石英胶结物流体平均盐度为 10.6%, 是正常海水盐度(3.5%) 的 2~6 倍, 说明形成热液矿物的流体主要为高温卤水。

#### 4.2 热液活动的差异性

无论是上述基于岩石学的观察或利用地球化学手段的测试, 其结果无不表明冀中拗陷中部雾迷山组中存在热液活动, 但不难发现, 热液活动的强度存在着较为明显的差异, 这种差异与区域岩浆活动和热液输导通道有关。

首先冀中拗陷中部岩浆活动受控于区域构造演化。中生代燕山运动的岩浆活动主要发育太行山隆起至保定凹陷一带, 对研究区影响不大。而随后以裂陷断陷为主的喜山运动所带来的岩浆活动对研究区产生了主要的影响。冀中拗陷内由于各区地壳拉张裂陷程度、主要活动方式和时期不同, 反映在岩浆活动上的差异也很大。总体来说, 冀中拗陷内火成岩分布具有自北西向南东火成岩由老变新, 反映了岩浆活动的迁移性(刘前志, 1992; 孙文亮, 2010)。岩浆活动最强烈的时期为沙河街组四段沉积末期至沙河街组三段沉积时期, 正是拉张裂陷最强烈的时期。沙河街组三段沉积末期至沙河街组二段沉积时期, 主要的拉张活动东移, 沙河街组一段至东营组沉积时期, 裂陷活动大大减弱, 至晚古近纪时从裂陷转入拗陷, 岩浆活动也随即停止(刘前

表 3 冀中拗陷中部雾迷山组不同胶结物中流体包裹体均一温度特征

Table 3 Homogenization temperature characteristics of fluid inclusions in different cements of the Wumishan Formation in central Jizhong Depression

构造单元	井名	取样深度 /m	不同胶结物中流体包裹体均一温度/°C						盖层 厚度 /m	地层 温度 /°C
			白云石		石英		萤石			
			范围	均值	范围	均值	范围	均值		
牛驼镇凸起	淀 5	2025.7	75~119	97.8	87~103	96	/	2008	75.5	
		2851.8	70~122	97.3	/	/	/	2840	99.8	
雁翎潜山	雁 33	2885.3	71~97	87.4	/	/	96~124	106	100.3	
		2887.2	88~123	99.4	/	/	/	/	100.3	
		2901.4	81~117	98.3	/	/	/	/	100.5	
任丘潜山	任 266	3174.4	89~132	103.7	/	/	108~118	112	3032	107.5
		3188.8	86~109	101.9	116~128	119.3	/	/	/	107.7
		3221.9	/	/	105~124	118.5	/	/	/	108.2
郑州潜山北部洼陷	郑 14	4976.4	117~139	127.6	/	/	124~132	128.9	4711	159.7

志, 1992)。因此, 冀中拗陷中部西北部(牛驼镇凸起)的岩浆活动要强于东南部(任丘潜山), 同样热液流体的温度也是西北要高于东南部。深部热液流体进入储集层需要输导通道的存在。构造作用产生的断裂和裂缝既可以使其附近的岩石强烈破碎提升其渗透性, 也可以为下部热液向上运移提供有利通道。新生代初期, 在拉张应力作用下, 发育了一系列正断层或反向正断层组成的次级翘倾断块及古潜山构造, 并形成了 NNW-SSW 向的裂缝(杨克绳, 1987; 肖阳等, 2018)。此时形成的切割基底的深大断裂沟通了深部岩浆源, 为热液活动提供了通道。

冀中拗陷中部构造断裂的类型和活动的时期决定了深部热液活动强弱的差异。各条断裂主要可分为基底断裂和表层断裂 2 大类, 控制凸起和潜山的主要正断裂都属于基底断裂, 如牛东断裂、任丘断裂、任西断裂、郑州断裂、河间断裂、刘李庄断裂和马西断裂等(杨克绳, 1987), 而表层断裂是与这些主要大断裂伴生并与之平行, 但只能控制上覆地层薄厚变化, 而不能控制构造生成的一系列小断距的次级断裂。因此, 能沟通深部岩浆的基底断裂附近的热液活动要强于表层断裂。然而由于各基底断裂的主要活动时期存在差异, 当断裂与岩浆活动时期相耦合时, 热液活动才可达到最大化。因此, 在  $E_{s4}-E_{s3}$  时期强烈活动的牛东断层、马西断层、同口断层以及在古近系持续活动的任西断层附近存在较强的热液活动(劳海港等, 2010, 2012; 毛黎光, 2014), 而在其他时期活动的断层附近热液活动较弱。另外, 属于控制凹陷的边界断层如牛东和马西断层的规模(断距、长度、深度)最大, 潜山的边界断层规模次之, 潜山断层的伴生断层的规模最小。与之对应的是表 3 的测温结果, 在牛东断层上的淀 5 井受到热液影响最大其中有 92.3% 的包裹体均一温度高于地层温度  $5^{\circ}\text{C}$  以上; 在任西断层东侧的任 266 井受到热液影响较大, 有 61.2% 的包裹体均一温度高于地层温度  $5^{\circ}\text{C}$  以上; 出岸断层的伴生断层旁的雁 33 井仅有 22.2% 的包裹体显示出热液作用, 热液影响进一步减小; 而在郑州北部洼陷中的郑 14 井中样品包裹体均一温度为正常地温形成, 虽然埋深最深, 但缺乏断层通道, 导致热液无法运移。

因此, 冀中拗陷中部岩浆活动主要在安新县西

北部、D35 井区、新家 4 井区和文 69 井-文 64 井一带, 范围与钻遇岩浆岩区域一致, 范围一般较为局限。而由岩浆提供热源的热液活动主要分布在岩浆活动区周缘, 其范围一般较大。基于钻井、岩心、薄片和地化分析结果, 硅质热液的主要活动区为安新-淀 5 井-雄县一线以北、郑 9 井-任 97 井-任 266 井以南、文 69 井-西 41 井-马检 1 井一线以东地区, 以碳酸盐矿物为主的热液主要活动在 D16 井-D19 井-淀 5 井-新家 4 井一线以北、雁 18-D34 井、任 48 井-任 239 井-任 266 井、马检 1 井-马 69 井一线以东地区(图 9)。

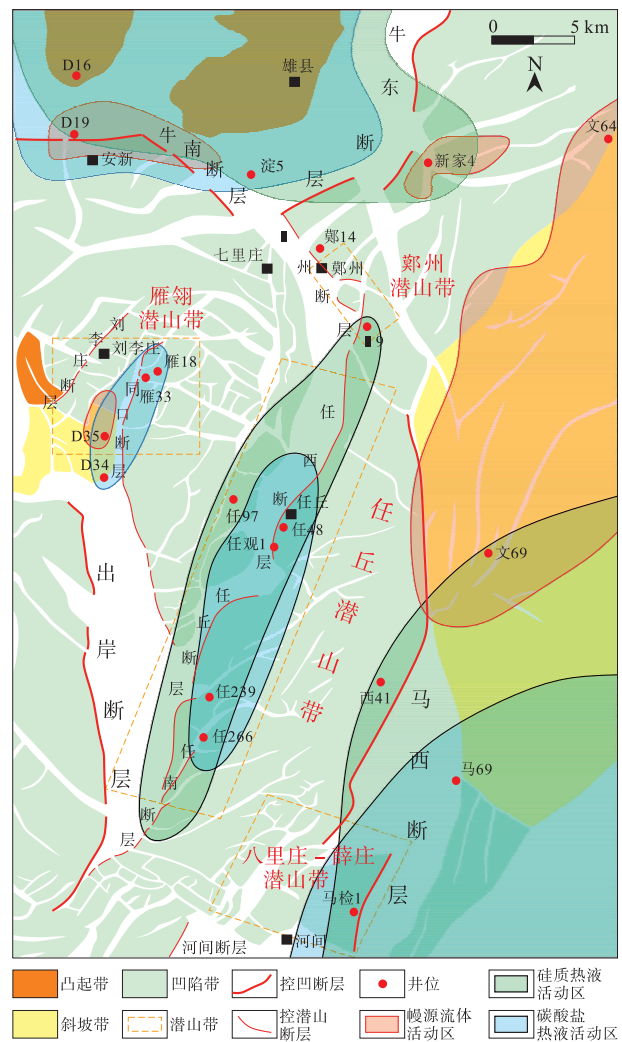


图 9 冀中拗陷中部雾迷山组热液活动分区图

Fig. 9 Zoning graph of hydrothermal activities of the Wumishan Formation in central Jizhong Depression

### 4.3 热液活动对储集层的改造

由于冀中拗陷中部雾迷山组的基质白云岩孔渗

极低较为致密 (Lu *et al.*, 2021), 因此, 热液流体只能以构造断裂形成的裂缝体系和前期表生岩溶形成的孔、洞与不整合面系统为主要通道进入岩体, 从而对储集层进行改造。雾迷山组经历了多期表生岩溶和构造破裂作用, 虽然在进入埋藏之后受到正常深埋成岩作用的影响, 孔、洞、缝系统有部分被充填胶结, 但也为热液的流动提供了基础。

前人模拟实验已经证实, 酸性流体对于碳酸盐岩的溶蚀速率随温度的升高而增大 (丁茜等, 2017)。而大规模的热液溶蚀的发生需要相对开放的条件, 即深部热液需要有排泄出地表的通道, 而研究区十分发育的深大断裂为深部热液溶蚀后的物质排出提供了有利通道。因此, 在雾迷山组深部仍可形成较大型的溶洞。研究认为, 当埋深超过 3000 m 时由于表生岩溶形成的洞穴会由于上覆地层压力发生垮塌, 难以保存 (Loucks, 1999), 而对于任丘潜山带的勘探证实了在距不整合面超 600 m、总体埋深超过 3000 m 的深部钻井时仍有大量放空、漏失现象 (余家仁等, 1998), 从侧面证实了热液溶蚀洞穴的存在。热液溶蚀基岩产生的孔洞对储集层有着建设性改造作用, 但从热液流体中沉淀出的热液矿物的充填、胶结和硅化作用对储集层又造成了破坏性的改造。即在岩心和镜下都可观察到热液溶蚀孔洞中充填一半充填石英或白云石 (图 4-c; 图 6-c, 6-d); 部分裂缝受到热液作用溶蚀扩大, 形成不规则的溶蚀边缘, 并且缝壁上被石英或白云石充填一半充填现象等。这 2 种现象既可以共生也可以独立存在, 但溶蚀作用略早于充填作用, 若热液溶蚀孔隙未被完全充填, 则可以作为有效的储集空间。同时, 受热液影响的重结晶作用将基岩泥晶白云石的晶体变大, 产生晶间孔或晶间溶孔, 也有利于储集层的改造 (图 5-b)。此外, 在区内各个潜山带钻井取心中常见到由水压力破裂作用形成的角砾结构 (图 4-i), 在未被完全胶结和充填的角砾间的残余孔隙, 也常可作为良好的储集空间。因此, 热液上涌产生的水压力破裂作用对储集层也具有建设性作用。在镜下可观察到基质白云岩在被岩浆大理岩化后, 大理岩颗粒的排列同基岩一样紧密 (图 5-a), 没有次生孔隙增加, 大理岩化过程基本没有改变白云岩原岩的储集性。

## 5 结论

1) 通过宏观和微观相结合的岩石学和地球化学等观测手段发现, 冀中拗陷中部潜山构造带雾迷山组中广泛发育的热液活动主要可分为 3 大类, 分别为幔源流体活动、以碳酸盐矿物为主的热液活动和硅质热液活动。

2) 冀中拗陷中部潜山构造带雾迷山组中热液活动强度存在明显差异, 这种差异受控于区域岩浆活动和热液输导通道。因此热液活动强度具有西北强于东南、断层活动与岩浆活动时期相耦合的基底断裂附近热液活动强度最强, 级别越高、规模越大的断层附近的热液活动越强。

3) 热液活动对储集层改造作用可分为溶蚀作用、充填作用、重结晶作用、水压力破裂作用、大理岩化作用和硅化作用。其中溶蚀作用、重结晶作用和水压力破裂作用对储集层有着建设性改造作用; 充填作用、胶结作用和硅化作用减少了储集空间, 是破坏性改造作用; 而大理岩化过程基本没有改变原岩的储集性。

## 参考文献 (References)

- 安广义, 王桂霞, 赵雄伟, 赵保顺, 史中华. 2005. 河北涞源白石山国家地质公园地质特征研究. 地学前缘, 12(4): 410. [An G Y, Wang G X, Zhao X W, Zhao B S, Shi Z H. 2005. Geological characteristics of Baishi Mountain National Geological Park in Laiyuan, Hebei Province. Earth Science Frontiers, 12(4): 410]
- 鲍志东, 季汉成, 梁婷, 韦明洋, 史燕青, 李宗峰, 鲁锴, 向鹏飞, 张华, 严睿, 郭玉鑫, 李卓伦, 万谱, 杨志波, 麻晓东, 刘锐, 刘灿星, 钟旭临, 郭晓琦, 蔡忠贤, 张水昌. 2019. 中新元古界原生白云岩: 以中国典型台地区为例. 古地理学报, 21(6): 869-884. [Bao Z D, Ji H C, Liang T, Wei M Y, Shi Y Q, Li Z F, Lu K, Xiang P F, Zhang H, Yan R, Guo Y X, Li Z L, Wan P, Yang Z B, Ma X D, Liu R, Liu C X, Zhong X L, Guo X Q, Cai Z X, Zhang S C. 2019. Primary dolostones of the Meso-Neoproterozoic: Cases on typical platforms in China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(6): 869-884]
- 曹瑛倬, 鲍志东, 鲁锴, 徐世琦, 王贵玲, 袁淑琴, 季汉成. 2021. 冀中拗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 Xiongxiang geothermal field. Acta Sedimentologica Sinica, 39(4): 863-872]
- 陈清华, 劳海港, 吴孔友, 吴兆徽, 崔永谦. 2013. 冀中拗陷碳酸盐岩深层古潜山油气成藏有利条件. 天然气工业, 33(10): 32-39. [Chen Q H, Lao H G, Wu K Y, Wu Z H, Cui Y J. 2013. Favorable hydrocarbon accumulation conditions for carbonate reservoirs in deep-buried hills in the Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. Natu-

- ral Gas Industry, 33(10): 32-39]
- 储雪蕾,张同钢,张启锐,冯连君,张福松. 2003. 蓟县元古界碳酸盐岩的碳同位素变化. 中国科学(D辑:地球科学), 33(10): 951-959. [Chu X L, Zhang T G, Zhang Q R, Feng L J, Zhang F S. 2003. Carbon isotope variation of Proterozoic carbonate rocks in Jixian. Science in China Series D-Earth Sciences, 33(10): 951-959]
- 崔树清. 2009. 冀中坳陷饶阳凹陷构造特征及油气聚集. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Cui S Q. 2009. The structural characteristics and pools of petroleum accumulation of Raoyang sag in Jizhong Depression. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 丁茜,何治亮,沃玉进,张军涛,范明,岳小娟. 2017. 高温高压条件下碳酸盐岩溶蚀过程控制因素. 石油与天然气地质, 38(4): 784-791. [Ding Q, He Z L, Wo Y J, Zhang J T, Fan M, Yue X J. 2017. Factors controlling carbonate rock dissolution under high temperature and pressure. Oil & Gas Geology, 38(4): 784-791]
- 冯明友,强子同,沈平,张健,陶艳忠,夏茂龙. 2016. 四川盆地高石梯-磨溪地区震旦系灯影组热液白云岩证据. 石油学报, 37(5): 587-598. [Feng M Y, Qiang Z T, Shen P, Zhang J, Tao Y Z, Xia M L. 2016. Evidences for hydrothermal dolomite of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica, 37(5): 587-598]
- 费宝生,汪建红. 2005. 中国海相油气田勘探实例之三:渤海湾盆地任丘古潜山大油田的发现与勘探. 海相油气地质, 10(3): 43-50. [Fei B S, Wang J H. 2005. Cases of discovery and exploration of marine fields in China(Part 3): Renqiu buried-hill oilfield, Bohai Bay Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 10(3): 43-50]
- 韩宝平. 2000. 任丘油田雾迷山组白云岩储集层的渗透性试验研究. 地质科学, 35(4): 396-403, 508. [Han B P. 2000. Study on permeability test of dolomite reservoir of Wumishan Formation in Renqiu oilfield. Scientia Geologica Sinica, 35(4): 396-403, 508]
- 韩俊,董少峰,尤东华,张胜,肖重阳,王英明. 2023. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩热液溶蚀及其油气勘探意义:以顺南蓬1井为例. 石油实验地质, 45(4): 770-779. [Han J, Dong S F, You D H, Zhang S, Xiao C Y, Wang Y M. 2023. Hydrothermal dissolution of deep-buried carbonate rocks and its significance for hydrocarbon exploration in Shunnan area, the Tarim Basin: taking Well Peng-1 in Shunnan area as a case. Petroleum Geology & Experiment, 45(4): 770-779]
- 何登发,崔永谦,张煜颖,单帅强,肖阳,张传宝,周从安,高园. 2017. 渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的构造成因类型. 岩石学报, 33(4): 1338-1356. [He D F, Cui Y Q, Zhang Y Y, Shan S Q, Xiao Y, Zhang C B, Zhou C A, Gao Y. 2017. Structural genetic types of paleoburied hill in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. Acta Petrologica Sinica, 33(4): 1338-1356]
- 黄思静,卿海若,胡作维,裴昌蓉,王庆东,王春梅,邵晓勇. 2008. 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用. 地球科学, 33(1): 26-34. [Huang S J, Qing H R, Hu Z W, Pei C R, Wang Q D, Wang C M, Gao X Y. 2008. Cathodoluminescence and diagenesis of the carbonate rocks in Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan Basin of China. Earth Science, 33(1): 26-34]
- 金之钧,朱东亚,胡文瑄,张学丰,王毅,闫相宾. 2006. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响. 地质学报, 80(2): 245-253. [Jin Z J, Zhu D Y, Hu W X, Zhang X F, Wang Y, Yan X B. 2006. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin. Acta Geologica Sinica, 80(2): 245-253]
- 旷红伟,李家华,彭楠,罗顺社,岑超. 2009. 燕山地区 1.6~1.0 Ga 时期碳酸盐岩碳、氧同位素组成、演化及其地质意义. 地学前缘, 16(5): 118-133. [Kuang H W, Li J H, Peng N, Luo S S, Cen C. 2009. The C and O isotopic compositions and their evolution recorded in the carbonate interval of the Yanshan area from 1.6 to 1.0 Ga, and their geological implications. Earth Science Frontiers, 16(5): 118-133]
- 劳海港,吴孔友,陈清华. 2010. 冀中坳陷调节带构造特征及演化. 地质力学学报, 16(3): 294-309. [Lao H G, Wu K Y, Chen Q H. 2010. Geologic character and evolution of the accommodation zone in the Jizhong Depression. Journal of Geomechanics, 16(3): 294-309]
- 劳海港,吴孔友,陈清华,吴兆徽. 2012. 冀中坳陷郑州变换带演化特征及控藏作用. 中国石油大学学报(自然科学版), 36(5): 12-19. [Lao H G, Wu K Y, Chen Q H, Wu Z H. 2012. Evolution characteristics of Maozhou transition zone and its control function of reservoirs forming in Jizhong Depression. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 36(5): 12-19]
- 李红,王良军,柳益群,曾韬,张冬冬,李文厚,周鼎武,杨康,董杨坤,彭毅峰. 2021. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液活动特征. 古地理学报, 23(1): 153-174. [Li H, Wang L J, Liu Y Q, Zeng T, Zhang D D, Li W H, Zhou D W, Yang K, Dong Y K, Peng Y F. 2021. Hydrothermal activities in the middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 23(1): 153-174]
- 李华芹,蔡红,秦正永,刘波. 1994. 蓟县中上元古界典型剖面锶同位素组成特征及其地层意义. 地球学报, (Z1): 232-244. [Li H Q, Cai H, Qin Z Y, Liu B. 1994. Strontium isotope compositions of Jixian Middle-Upper Proterozoic strata type section and their significances. Acta Geoscientia Sinica, (Z1): 232-244]
- 李静,查明. 2010. 基于流体包裹体的任丘油田雾迷山组成藏期次确定与古压力恢复. 中国石油大学学报(自然科学版), 34(4): 38-43. [Li J, Zha M. 2010. Determination of oil accumulation period and building up of paleopressure of Wumishan Formation in Renqiu oilfield by using fluid inclusion. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 34(4): 38-43]
- 李任伟,陈锦石,张淑坤. 1999. 中元古代雾迷山组碳酸盐岩碳和氧同位素组成及海平面变化. 科学通报, 44(16): 1697-1702. [Li R W, Chen J S, Zhang S K. 1999. Carbon and oxygen isotopic composition and sea level change of carbonate rocks from the Mesoproterozoic Wumishan Formation. Chinese Science Bulletin, 44(16): 1697-1702]
- 李双建,杨文博,韩月卿,高平,沃玉进,何治亮. 2021. 四川盆地中二叠统热液白云岩化作用及其储层改造意义. 石油与天然气地质, 42(6): 1265-1280. [Li S J, Yang T B, Han Y Q, Gao P, Wo Y J, He Z L. 2021. Hydrothermal dolomitization and its role in improving Middle Permian reservoirs for hydrocarbon accumulation, Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 42(6): 1265-1280]

- 刘前志. 1992. 冀中拗陷新生代火成岩分布及含气特征. 石油实验地质, 14(2): 188-194. [Liu Q Z. 1992. Distribution and gas-bearing characteristics of the Cenozoic igneous rocks in the Jizhong Depression. *Petroleum Geology & Experiment*, 14(2): 188-194]
- 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]
- 鲁锴, 刘玲, 鲍志东, 季汉成, 刘金侠, 李磊, 李晋, 鲍逸非, 牛博, 陈振良, 曹瑛倬, 陈欣怡, 李宗峰. 2023. 基于可钻性分析及三维地质建模的钻探有利区优选: 以雄安新区雾迷山组为例. 现代地质, 37(5): 1398-1410. [Lu K, Liu L, Bao Z D, Ji H C, Liu J X, Li L, Li J, Bao Y F, Niu B, Chen Z L, Cao Y Z, Chen X Y, Li Z F. 2023. Favorable drilling target selection based on drillability analysis and 3D geological modeling: a case study in the Wumishan Formation, Xiong'an New Area. *Geoscience*, 37(5): 1398-1410]
- 罗宁, 张军, 李健敏, 辛守良. 2021. 雄安新区及其周边古潜山地热资源开发利用前景. 天然气工业, 41(7): 160-171. [Luo N, Zhang J, Li J M, Xin S L. 2021. Development and utilization prospect of the geothermal resources in the buried hills of the Xiong'an New Area and its periphery. *Natural Gas Industry*, 41(7): 160-171]
- 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. [Ma S W, Wei L, Zhao F, Zhang Z T, Wei J S, Wang P, Yin X L, Zhao L Y. 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]
- 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. 地学前缘, 30(6): 1-13. [Ma Y S, Cai X Y, Li H L, Zhu D Y, Zhang J T, Yang M, Duan J B, Deng S, You D H, Wu C Y, Chen S R. 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]
- 毛黎光. 2014. 岩浆底辟干扰下的裂陷盆地发育特征: 以古近纪渤海湾盆地冀中拗陷为例. 浙江大学博士学位论文. [Mao L G. 2014. Characteristics of rifting interfered by magmatic diapirism, an example from Paleogene Jizhong Rift of Bohai Bay Basin, East China. Doctoral dissertation of Zhejiang University]
- 聂泽同, 梁定益, 赵崇贺, 宋志敏. 2002. 一种新的地质地貌景观类型: 河北省白石山大理岩构造峰林特点及成因. 地质通报, 21(6): 357-362. [Nie Z T, Liang D Y, Zhao C H, Song Z M. 2002. A new type of geological-geomorphological landscape: the Baishi Mountain marble structural "peak forest" hoodoos and its origin. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 357-362]
- 潘文庆, 胡秀芳, 刘亚雷, 高奇东, 叶瑛. 2012. 塔里木盆地西北缘奥陶系碳酸盐岩中两种来源热流体的地质与地球化学证据. 岩石学报, 28(8): 2515-2524. [Pan W Q, Hu X F, Liu Y L, Gao Q D, Ye Y. 2012. Geological and geochemical evidences for two sources of hydrothermal fluids found in Ordovician carbonate rocks in northwestern Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2515-2524]
- 祁凯. 2021. 华北克拉通中西部中—新生代岩石圈热—流变结构及深部岩浆—热力作用过程. 西北大学博士学位论文. [Qi K. 2021. Meso-Cenozoic lithospheric thermal-rheological structure and deep magmatic-thermal process in the WNCC. Doctoral dissertation of Northwest University]
- 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. [Qi R, Li G R, Zhang J T, Wang F B, Li Y X, Yang F, Liu L, He S, Tian J Q, Li X X. 2024. Mechanism and significance of hydrothermal activity in the Majiagou Formation, Fuxian area, Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(3): 632-643]
- 任战利. 2000. 中国北方沉积盆地热演化史的对比. 石油与天然气地质, 21(1): 33-37. [Ren Z L. 2000. Comparison of thermal evolution history in sedimentary basins, North China. *Oil & Gas Geology*, 21(1): 33-37]
- 孙文亮. 2010. 冀中拗陷火成岩成藏条件研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Sun W L. 2010. A study of accumulation of volcanic in Jizhong Depression. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 田辉, 李怀坤, 相振群, 范昌福, 张健, 刘欢, 钟焱. 2021. 蓟县中—新元古界剖面团山子组—景儿峪组碳氧同位素演化特征及其沉积环境与构造意义. 华北地质, 44(1): 4-13. [Tian H, Li H K, Xiang Z Q, Fan C F, Zhang J, Liu H, Zhong Y. 2021. Characteristics of the carbon and oxygen isotopes of the Tuanshanzi Formation-Jingeryu Formation from the Meso-Neoproterozoic section in the Jixian County and constraints on depositional-tectonic environment. *North China Geology*, 44(1): 4-13]
- 王良军, 李红, 曾韬, 柳益群, 潘磊, 李让彬, 李文厚, 张冬冬, 焦鑫, 杨康, 董杨坤. 2022. 四川盆地东部茅口组白云岩成因: 来自岩石学、矿物学和地球化学的证据. 古地理学报, 24(5): 989-1016. [Wang L J, Li H, Zeng T, Liu Y Q, Pan L, Li R B, Li W H, Zhang D D, Jiao X, Yang K, Dong Y K. 2022. Origins of dolostones of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin: evidence from lithology, mineralogy, and geochemistry. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(5): 989-1016]
- 王思琪, 张保健, 李燕燕, 邢一飞, 袁文真, 李郡, 高俊, 赵甜. 2021. 雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制. 地质科技通报, 40(3): 12-21. [Wang S Q, Zhang B J, Li Y Y, Xing Y F, Yuan W Z, Li J, Gao J, Zhao T. 2021. Heat accumulation mechanism of deep ancient buried hill in the northeast of Gaoyang geothermal field, Xiong'an New Area. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(3): 12-21]
- 王玉萍, 董春梅, 陈洪德, 苏中堂, 张长俊, 郝哲敏. 2014. 鄂尔多斯盆

- 地中西部奥陶纪热液活动的证据及其对储层发育的影响. 海相油气地质, 19(2): 23-31. [Wang Y P, Dong C M, Chen H D, Su Z T, Zhang C J, Hao Z M. 2014. Petrological evidence of Ordovician hydrothermal activities and its geological significance to reservoir development in central and western parts of Ordos Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 19(2): 23-31]
- 吴孔友, 李继岩, 陆诗阔, 崔永谦, 臧明峰. 2010. 冀中饶阳凹陷潜山演化类型及成藏差异性分析. 海相油气地质, 15(1): 27-34. [Wu K Y, Li J Y, Lu S K, Cui Y Q, Zang M F. 2010. Evolution types and hydrocarbon accumulation differences of buried hills in Raoyang sag, Jizhong Depression. *Marine Origin Petroleum Geology*, 15(1): 27-34]
- 肖阳, 刘国平, 韩春元, 朱姜伟, 周从安, 吕文雅, 高园, 曾联波, 马学峰. 2018. 冀中坳陷深层碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征与主控因素. 天然气工业, 38(11): 33-42. [Xiao Y, Liu G P, Han C Y, Zhu J W, Zhou C A, Lü W Y, Gao Y, Zeng L B, Ma X F. 2018. Development characteristics and main controlling factors of natural fractures in deep carbonate reservoirs in the Jizhong Depression. *Natural Gas Industry*, 38(11): 33-42]
- 杨克绳. 1987. 冀中坳陷断裂形成机理的探讨. 石油地球物理勘探, 22(3): 292-306. [Yang K S. 1987. An approach to genesis mechanism of fault system in Jizhong Depression. *Oil Geophysical Prospecting*, 22(3): 292-306]
- 易士威, 赵淑芳, 范炳达, 刘井旺, 杨年荣, 谢怀兴. 2010. 冀中坳陷中央断裂构造带潜山发育特征及成藏模式. 石油学报, 31(3): 361-367. [Yi S W, Zhao S F, Fan B D, Liu J W, Yang N R, Xie H X. 2010. Development characteristics of buried-hill and reservoir-forming pattern in central faulted structural belt of Jizhong Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 31(3): 361-367]
- 余家仁, 雷怀玉, 刘趁花. 1998. 试论海相碳酸盐岩储层发育的影响因素: 以任丘油田雾迷山组为例. 海相油气地质, 3(1): 39-48, 5. [Yu J R, Lei H Y, Liu C H. 1998. A discussion of factors influencing marine carbonate rock reservoir development: a case study of Wumishan Formation of Renqiu oilfield. *Marine Origin Petroleum Geology*, 3(1): 39-48, 5]
- 张敏, 王正允, 张紫光, 陈梦蛟, 胥博文. 2008. 碳酸盐岩宏观储集空间研究: 以冀北坳陷中元古界蓟县系雾迷山组和铁岭组为例. 石油地质与工程, 22(5): 37-40. [Zhang M, Wang Z R, Zhang Z R, Chen M J, Xu B W. 2008. Study on macro-reservoir space of carbonate rocks: a case of the Wumishan and Tieling Formations of Mesoproterozoic Jixian System in Northern Hebei Depression. *Petroleum Geology and Engineering*, 22(5): 37-40]
- Allan J R, Wiggins W D. 1993. Dolomite reservoirs: geochemical techniques for evaluating origin and distribution. Tulsa: American Association of Petroleum Geology, 1-129.
- Davies G R, Smith L B. 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1641-1690.
- Guo H, Du Y S, Kah C L, Huang J H, Hu C Y, Huang H, Yu W C. 2013. Isotopic composition of organic and inorganic carbon from the Mesoproterozoic Jixian Group, North China: implications for biological and oceanic evolution. *Precambrian Research*, 224: 169-183.
- Katz D A, Eberli G P, Swart P K, Smith Jr L B. 2006. Tectonic-hydrothermal brecciation associated with calcite precipitation and permeability destruction in Mississippian carbonate reservoirs, Montana and Wyoming. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1803-1841.
- Loucks R G. 1999. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications. *AAPG Bulletin*, 83(11): 1795-1834.
- Lu K, Bao Z D, Sheng M, Bao Y F, Dai Q Q, Cao Y Z, Liu R, Zhang S C, Li J. 2021. Influence of internal textures in fracture development in dolostones: a case study in the Mesoproterozoic Wumishan Formation in the Jizhong Depression, Bohai Bay Basin, North China. *Marine and Petroleum Geology*, 125(9): 104877.
- Machel H G, Lonner J. 2002. Hydrothermal dolomite: a product of poor definition and imagination. *Sedimentary Geology*, 152(3/4): 163-171.
- Smith L B, Davies G R. 2006. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: introduction. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1635-1640.
- White D E. 1957. Thermal waters of volcanic origin. *Geological Society of America Bulletin*, 68(1): 1637-1658.
- Zhang L, Ji H C, Chen L, Liu J X, Li H Q. 2019. Characteristics of geothermal reservoirs in the Wumishan Formation and groundwater of the Middle-Upper Proterozoic and the geothermal status in the Beijing-Tianjin-Hebei region: implications for geothermal resources exploration. *Energy Exploration & Exploitation*, 37(2): 811-833.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 龚承林)