

雄安新区雾迷山组岩溶裂隙发育特征

唐博宁^{1,2)}, 朱传庆^{1,2)}, 邱楠生^{1,2)}, 崔悦^{1,2)}, 郭飒飒^{1,2)}, 陈驰^{1,2)}

1) 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;

2) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249

内容提要:雄安新区碳酸盐岩岩溶热储是具有重大开发潜力的优质地热资源。理清雾迷山组储层中岩溶裂隙的形成演化过程及发育特征,对地热资源的形成与聚敛研究具有重要作用,也是合理有效地开发地热资源的前提。根据岩芯采样、薄片、钻井、测井等资料,对雾迷山组岩溶裂隙的形成演化与几何特征进行了详细分析。结果表明:雄安新区岩溶和裂隙的形成与构造活动密切相关,以印支运动晚期至喜马拉雅运动期间最为强烈,形成了最有利储层发育的岩溶裂隙。雾迷山组裂隙带平均厚度和平均间隔分别为4.70m和4.05m,储厚比平均为41.90%。储层内部裂隙的走向主要为近北东向,倾角集中在50°~90°之间。面积裂隙频率达到5.34条/m²。裂隙的长度和开度平均分别为1.20m和95.16μm。多种物质充填裂隙,以白云石、黄铁矿、石英最为常见,含有数量较多的半充填和未充填裂隙。现今地应力有助于裂隙的开启,储层中裂隙网络发育,连通性好,具有非常好的导水储水性能,为雾迷山组地热资源富集提供了良好条件。

关键词:雄安新区;雾迷山组;岩溶裂隙;形成过程;几何特征

地热资源作为可循环利用的绿色清洁能源,目前在国内外正受到越来越多的关注,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; Kömürçü et al., 2009; Axelsson, 2010; Ghassemi, 2012; Jiang Haiyang et al., 2019; Tang Boning et al., 2019; Yan Xiaoxue et al., 2019; Yang Xunchang et al., 2019)。雄安新区因其独特的地质结构孕育出丰富的地热资源,被建议作为地热能区域性高效开发利用示范区(China Geological Survey et al., 2018)。雄安新区可利用的地热资源分为三类:200m以浅的第四系浅层地热能、200~3000m的深层地热能以及3000m以深的超深层地热能(Pang Zhonghe et al., 2017)。深层地热能由上部的砂岩储层和下部的碳酸盐岩储层构成。相较于回灌率低的砂岩孔隙热储,碳酸盐岩热储中岩溶裂隙发育,具有储量大、易开发、回灌可达百分之百的特点,是目前国内地热研究的热点区域之一。理清热储层的相关物理特性

是合理高效利用深部岩溶地热资源的重要前提。

雄安新区范围内首次发现热水始于20世纪70年代,在此之后许多的地热工作者在研究区内开展了大量的研究工作,针对研究区内的岩石热物理性质、温度场分布、大地热流、岩石圈热结构等进行了一系列工作,已初步了解现今地温场基本特征(Chen Moxiang et al., 1982, 1990; Chang Jian et al., 2016; Jiang Guangzheng et al., 2016; Cui Yue et al., 2019; Guo Sasa et al., 2019; Wang Zhuting et al., 2019)。近年来针对深部岩溶热储的储层特性也进行了一定的研究,包括热储的岩性特征、形成演化过程、储集空间类型等,加强了人们对储层内部的认识(Liu Juan, 2018; Lu Kai et al., 2019; Dai Minggang et al., 2020)。但目前相关工作仍然存在一些不足,早前的研究主要针对浅部地层,对于深部地层主要集中于岩石学特性的研究,定性地进行孔隙裂隙类型分析,对于雾迷山组储层内部岩溶裂隙发育的几何物理特征刻画

注:本文为国家重点研发计划项目(编号2018YFC0604302)资助的成果。

收稿日期:2020-05-05;改回日期:2020-06-06;网络发表日期:2020-06-09;责任编辑:周健。

作者简介:唐博宁,男,1994年生。硕士,研究方向为地热地质学与低温热年代学。Email: tangboning@foxmail.com。通讯作者:朱传庆,男,1981年生。副教授,研究方向为地热地质学及盆地构造-热演化等。Email: zhucq@cup.edu.cn。

引用本文: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, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020232.

Tang Boning, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, Cui Yue, Guo Sasa, Chen Chi. 2020. Characteristics of the karst thermal reservoir in the Wumishan Formation in the Xiong'an New Area. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2002~2012.

不够深入。

本文在前人研究的基础上,结合基础地质、地球物理勘探、钻井和测井、岩芯薄片等相关资料,对雾迷山组岩溶热储的形成过程进行了分析,总结了岩溶裂隙发育的几何特征,明确了岩溶裂隙的连通性质,为探明雾迷山组储层特征提供了有力支撑。

1 地质背景

雄安新区位于冀中拗陷北部,大地构造上处于

华北陆块中东部的渤海湾盆地西北部(图 1)。冀中拗陷北为燕山褶皱带,西接太行山东缘断层,南与邢衡隆起毗邻,东与沧县隆起相邻。研究区重要的构造单元为牛驼镇凸起、容城凸起、高阳低凸起,四周被凹陷环绕,北部是廊坊固安凹陷,东部及东北部为霸县凹陷和徐水凹陷,西南和西部为保定凹陷和徐水凹陷。研究区在平面上呈三角形展布,总面积约为 2000km²。

研究区自太古宙以来,经历了漫长而复杂的地

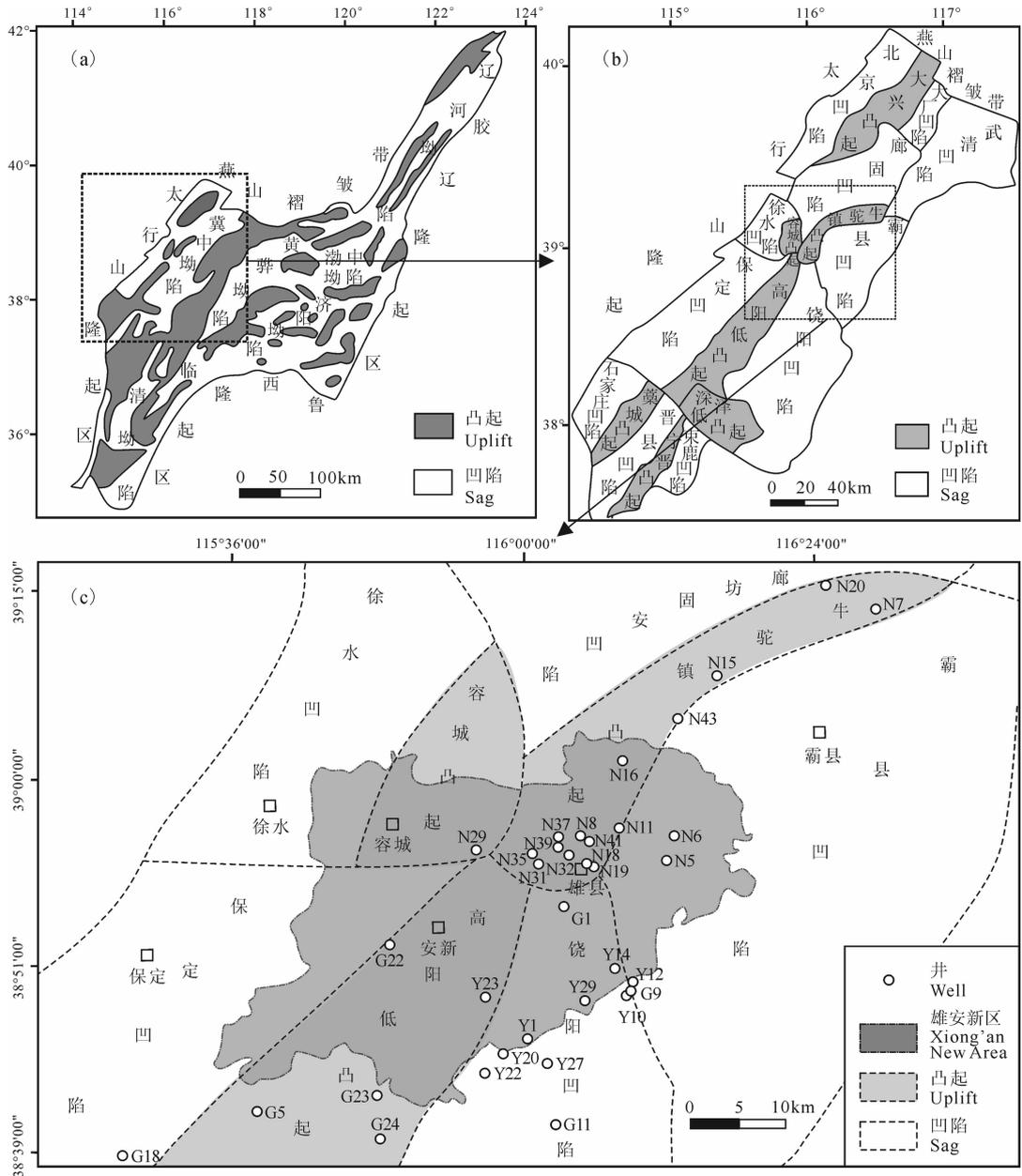


图 1 雄安新区大地构造位置及构造单元划分

Fig. 1 Geotectonic location and tectonic units of Xiong'an New Area

(a)—渤海湾盆地构造简图;(b)—冀中拗陷构造简图;(c)—雄安新区构造简图

(a)—Tectonic sketch of Bohai Bay basin;(b)—tectonic sketch of Jizhong depression;(c)—tectonic sketch of Xiong'an New Area

质演化过程(Sun Aiqun et al., 2000; Zhu Rixiang et al., 2011; Xu Jie et al., 2015)。雄安新区基底形成于太古宙和古元古代期间,经历了迁西运动、阜平运动、吕梁运动等多次克拉通化事件和构造-热事件,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(Zhai Mingguo, 2008)。中一新元古代期间接受了地台型沉积,以雾迷山组为主的蓟县系碳酸盐岩地层在此时沉积形成。之后基底抬升至地表后发生裂陷作用,地层遭受一定程度剥蚀。古生代和早一中三叠世期间,周围发生了诸多的构造事件,构造活动较弱,并未改变基本属性,整体上以稳定抬升为主,期间发生了长时期的沉积间断,地层间多为平行不整合接触,主要沉积层有寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系等(Qi Jiafu 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,产生了强烈的构造活动,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,形成了不同时期的、广泛分布的各种陆相盆地(Ma Xingyuan et al., 1983)。冀中拗陷内部凸起与凹陷相间发育的格局形成于此时。古新世是凸起和凹陷形成雏形时期,渐新世期间牛驼镇凸起和容城凸起保持抬升,上部地层从古近系至雾迷山组受到严重的风化剥蚀;高阳低凸起受到的剥蚀程度弱,沉积了相对较薄地层。中新世期间,牛驼镇凸起、容城凸起继承了前期的构造特征,继续经历抬升剥蚀,直至上新世的明化镇期,冀中拗陷全区进入沉降阶段,最终形成现今的地质面貌(Yang Haimeng et al., 2014; Li Fei et al., 2016; Liu Juan, 2018)。

2 雾迷山组岩溶裂隙的形成

雄安新区的岩溶和裂隙的形成与构造活动息息相关。根据雄安新区所经历的构造活动、应力方向以及前人研究成果总结分析(Zhu Jiangwei, 2016; Xiao Yang et al., 2018; Dai Minggang et al., 2020),裂隙主要形成于以下时期:中元古代至中早三叠世期间,虽经历过多次构造运动,地层整体以稳定的抬升为主,主要受到近南北向的水平挤压应力,形成了一组北西向断裂和一组北西、北北东向共轭剪切节理。燕山运动期间,研究区发生了大规模的拉张开裂、裂陷解体,强烈的构造运动产生了大量的断裂,此时主要压应力方向为北西向,形成了众多北东向、北北东向的压扭性断裂以及近东西向张扭性断裂。喜马拉雅运动期间,断块升降活动明显,边界

断层活跃,受到以北东东向为主的压应力作用,挤压形成了北北西向的裂隙。多期次的裂隙经过产生、重叠、复合,在研究区内形成了错综复杂的裂隙网络。

结合前人研究成果分析(Lu Kai et al., 2019; Dai Minggang et al., 2020),认为研究区岩溶的形成经历了以下过程:雾迷山组沉积初期,处于大气淡水成岩环境中,随着海平面短暂的、阶段性的相对下降,尚未固结成岩的地层间歇性地暴露于海平面。在大气降水淋滤和溶蚀作用下,形成粒内溶孔、铸模孔、粒间溶孔及溶缝和溶洞,这一时期构造活动不剧烈,岩溶作用有限。之后芹峪运动使地层抬升,造成碳酸盐岩地层暴露于海平面之上,经历了短暂的风化侵蚀和大气降水淋滤作用,在原生孔隙基础上扩大和增加,形成次生孔隙。由于发生时间较早,持续时间较短,溶蚀作用的程度较弱,后期改造使得该阶段形成的岩溶不再明显。

从印支运动晚期至喜马拉雅运动期间,强烈的构造作用使得凸起区碳酸盐岩地层在遭受抬升作用的同时,经受了长期的风化剥蚀和大气降水淋滤,形成了大量的溶孔、溶洞、溶缝,存在明显风化壳,与上覆地层不整合接触,钻井记录中有明显的钻具放空和泥浆漏失的现象。此时岩溶的发育程度与碳酸盐岩内部的古潜水面、地层界面以及断层面密切相关。与此同时岩浆活动剧烈,发生有热液溶蚀。此时形成的表生期岩溶最有利于储层建设,岩溶类型主要包括风化岩溶带、断层岩溶带和顺层岩溶带(Lin Li, 2006)。

后期强烈的构造作用使得碳酸盐岩地层产生大量断层和裂隙,改善了岩石的渗透性,加深了岩溶作用的深度,促进了岩溶的发展,形成了有利于热储发育的储集空间和运移通道。

3 雾迷山组岩溶裂隙几何特征

掌握岩溶裂隙的几何物理性质,是研究地热资源在如何汇聚并储存的重要前提,对于研究热储层内部的导水和储水性具有重要作用。本文基于分布于研究区内及周围的36口井的钻井、测井、岩石薄片等信息(钻井位置如图1所示),对雾迷山组岩溶裂隙进行了详细分析。

3.1 储集空间类型

雄安新区雾迷山组地层自形成以后,受到多期次的成岩作用、构造活动、风化剥蚀、淋滤作用、热液活动等影响,形成了以孔、洞、缝为特征的岩溶裂隙

储层。前人通过野外露头、钻井岩芯、岩石薄片分析等对储集空间类型进行了详细的研究(Xiao Yang et al., 2018; Lu Kai et al., 2019; Dai Minggang et al., 2020),分为两大类型:孔洞型和裂隙型。孔洞型主要包括晶间孔、藻架孔、粒间孔、粒内孔、溶蚀孔洞等;裂隙型主要包括构造缝、溶蚀缝、风化缝、层间缝、缝合线等。

3.2 裂隙带的位置及厚度

地层中的裂隙并非均匀分布的,裂隙空间体积只占整个岩体的千分之几。具有储水、导水能力的裂隙在岩体中一般是呈层出现的,形成局部裂隙发育带。根据测井曲线能较好地识别裂隙发育带,具有以下识别特征:深浅电阻率值减小、自然伽马值降低、声波时差和中子增大、密度降低、双井径曲线扩径等。

根据 22 口测井解释的钻井分析,雾迷山组内部裂隙带离顶面距离最小值为 0m,即直接在储层顶面发育裂隙,最大值为 192.4m,总体平均距离为 18.39m(表 1)。多数裂隙带在雾迷山组顶面以下 10m 以内出现(图 2),该范围内占比达到 68.2%,平均值为 4.4m。除 N15 井裂隙带离顶面距离为最大值,其余分布在 10~40m 内,说明在研究区内大部分地区,从雾迷山组的顶部往下便发育有裂隙。

表 1 雄安新区雾迷山组裂隙带分布位置及厚度统计表
Table 1 Distribution and thickness statistics of fracture zone in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

类型	最小值	最大值	总体平均值	集中平均值
距顶面距离(m)	0	192.40	18.39	4.40
裂隙带间隔(m)	0.40	55.00	9.42	4.05
裂隙带厚度(m)	0.40	86.40	8.23	4.70
裂隙带占比(%)	1.38	85.71	41.90	

裂隙带并非均匀地分布在地层中,裂隙带之间的间隔如图 3、表 1 所示。裂隙带间距最小为 0.4m,最大可达 55m,总体平均间距为 9.42m。间距大多小于 10m,以小于 2m 的间距最多,10m 内平均间距为 4.05m。大部分裂隙带的间距较近,只在少数地层中间距较远。

研究区内裂隙带的最小厚度为 0.4m,最大厚度为 86.4m,总体平均厚度为 8.23m(表 1)。裂隙带的厚度分布如图 4 所示,大多数分布在 14m 内,14m 以内平均值为 4.70m。除个别地区裂隙带厚度大于 20m,总体厚度分布较为均一。

裂隙发育带厚度占比如表 1 所示(由于大多数钻井只揭露了上部地层并没有钻穿,占比即为裂隙

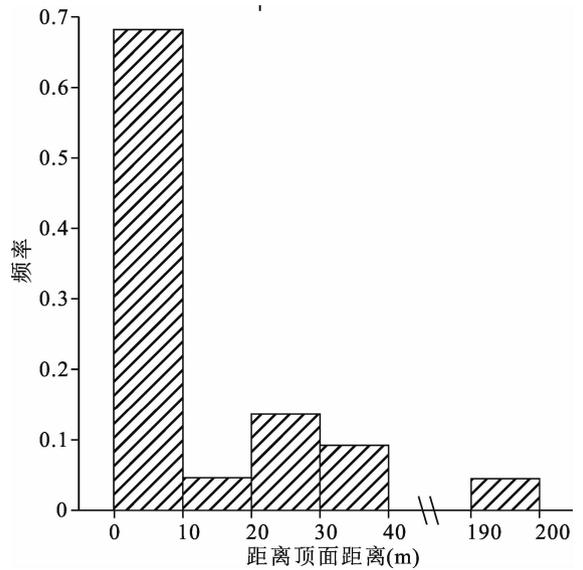


图 2 雄安新区雾迷山组裂隙带距顶面距离分布直方图
Fig. 2 Histogram of distance between the fracture zone and top surface in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

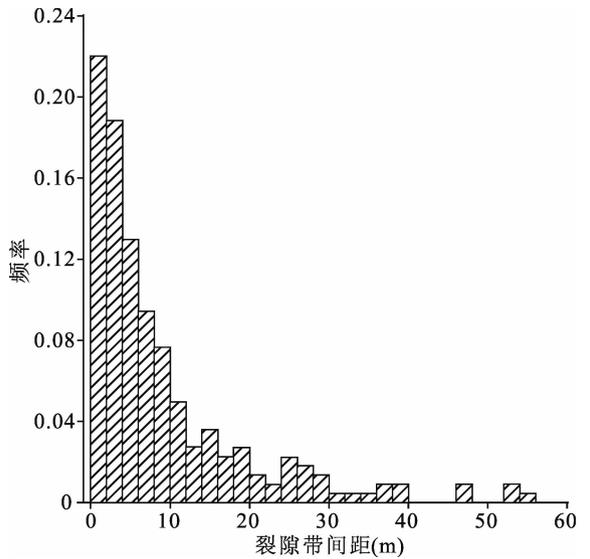


图 3 雄安新区雾迷山组裂隙带间距分布直方图
Fig. 3 Histogram of spacing distance between fracture zones in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

带厚度与已揭露雾迷山组地层厚度的比值)。在裂隙带不发育地区,占比低至 1.38%,而在裂隙带极其发育地区,占比高达 85.71%,总体平均储厚比为 41.90%。说明在钻井揭露的地层中,裂隙普遍发育,为雾迷山组成为优质的热储提供了良好的条件。

3.3 裂隙的方位

根据 N5 井雾迷山组地层的 FMI 测井结果(图 5),同时结合前人关于牛东潜山雾迷山组裂隙走向和倾角的研究结果(图 6)(Zhu Jiangwei, 2016),发

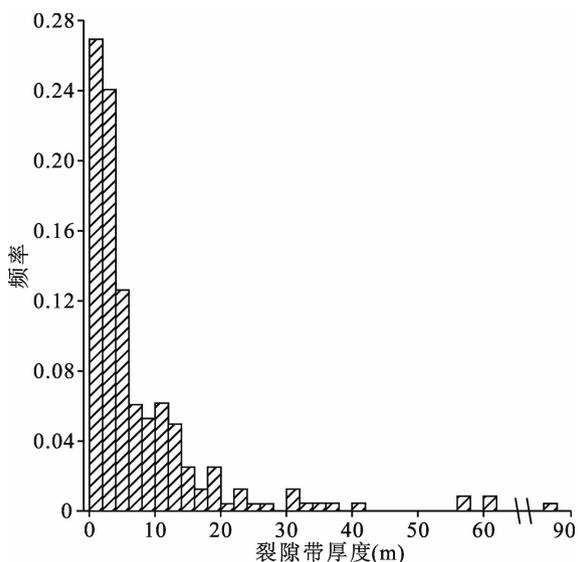


图4 雄安新区雾迷山组裂隙带厚度分布直方图
Fig. 4 Histogram of fracture zone thickness in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

现雾迷山组裂隙的走向主要为近北东向,其次为近东西向。裂隙的倾向主要为近南东向,其次为近北西向。雾迷山组内部裂隙的走向及倾向与研究区内的深大断裂牛东断裂、容城断裂、高阳断裂等相似,反映出雾迷山组内部的微观裂隙方位和宏观大断裂具有一致性。两者均主要形成于燕山期和喜马拉雅期,受不同方向压应力挤压作用产生。

根据裂隙的倾角可对裂隙分类:倾角小于 30° 为低角度裂隙,介于 30° 和 60° 之间为中角度裂隙,大于 60° 为高角度裂隙。研究区内倾角主要集中在 $50^\circ\sim 90^\circ$ 之间,高角度和中角度裂隙占比较高,而接近水平的低角度裂隙占比较少。以较高角度为主的

裂隙构成了地下水的垂向运移通道,有利于地下水由下至上补给储层。

3.4 裂隙的密度

通常用3种方法表示裂隙密度。第一种是裂隙度:单位体积/面积/长度内裂隙的体积/面积/开度的占比;第二种是裂隙频率:单位体积/面积/长度内裂隙的条数;第三种是裂隙率:单位体积/面积/长度内裂隙的总面积/总长度/个数的占比(Xiang Yanyong, 2011)。FMI测井利用组合电极阵列测量井壁附近的电阻率变化,通过对测井数据处理,可识别地层产状、砾石大小、裂隙、地应力方向等,分辨率为5mm。成像测井资料能够反映出真实地层中裂隙的形态特征,前人已经广泛地利用FMI成像测井获取裂隙的方位、长度、密度、宽度等数据,研究地层中裂隙的几何特征,取得了良好效果(Feng Bin et al., 2003; Huang Hua, 2008; Zhang Chengen, et al., 2011; Zhang Xiaofeng, 2011)。根据N5井5580~6100m井段和Y27井4090~4365m井段FMI测井解释成果,得到FMI裂隙密度与FMI裂隙长度。FMI裂隙密度是单位长度井段内揭露的裂隙总数目,即面积裂隙频率;FMI裂隙长度是指单位面积井壁所揭露的裂隙的长度总和,即面积裂隙率。

研究区面积裂隙频率总体范围在 $0.07\sim 13.6$ 条/ m^2 ,平均为 5.34 条/ m^2 。如图7所示,单位面积内裂隙条数主要在 $0\sim 7$ 条,但是8条及以上也不少。研究区内的面积裂隙率总体分布在 $0.36\sim 12.3m/m^2$ (图8),平均裂隙率为 $5.83m/m^2$,裂隙率主要分布在 $2\sim 7m/m^2$ 。平均面积裂隙频率和面积裂隙率均较高,反映出研究区内裂隙总体较为发育。

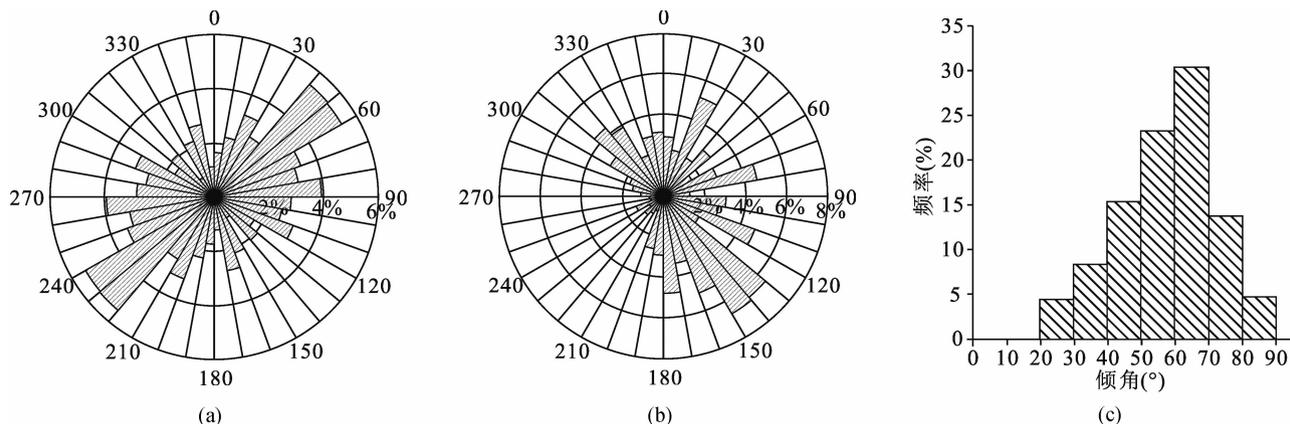


图5 N5井雾迷山组裂隙方位图

Fig. 5 Fracture azimuth of Wumishan Formation in well N5

(a)—裂隙走向玫瑰花图;(b)—裂隙倾向玫瑰花图;(c)—裂隙倾角分布直方图

(a)—Rose diagram of fractures trend; (b)—rose diagram of fractures tendency; (c)—distribution histogram of dip angle of fractures

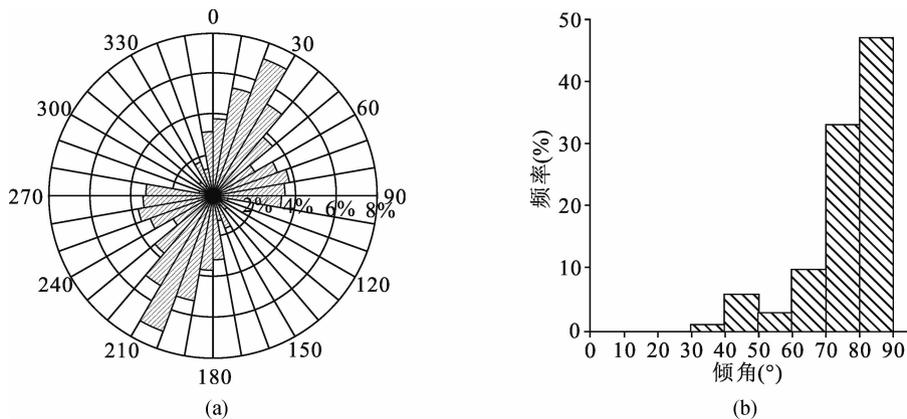


图 6 牛东潜山雾迷山组裂隙方位图(据 Zhu Jiangwei,2016 修改)

Fig. 6 Fracture azimuth in Wumishan Formation in Niudong buried hill (adapted from Zhu Jiangwei, 2016)

(a)—裂隙走向玫瑰花图;(b)—裂隙倾角分布直方图

(a)—Rose diagram of fractures trend; (b)—distribution histogram of dip angle of fractures

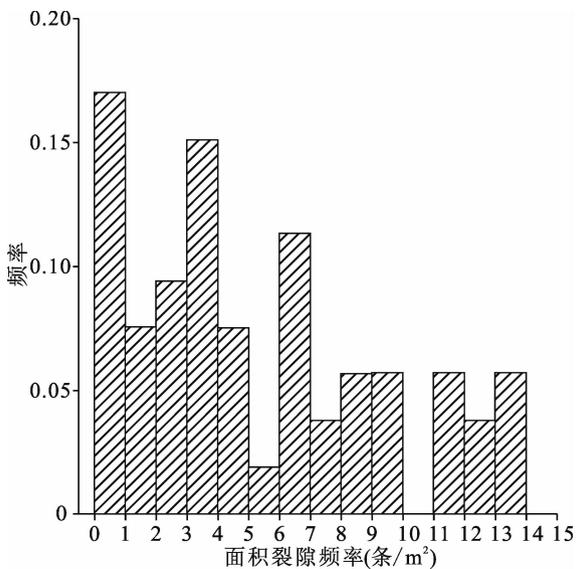


图 7 雄安新区雾迷山组面积裂隙频率分布直方图

Fig. 7 Histogram of fracture frequency in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

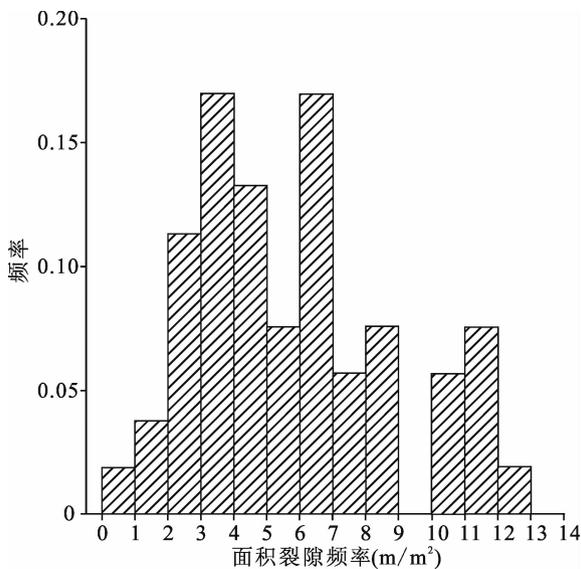


图 8 雄安新区雾迷山组面积裂隙率分布直方图

Fig. 8 Histogram of fracture rate in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

3.5 裂隙的长度

将 FMI 裂隙长度除以 FMI 裂隙密度,得到的结果可近似地表示裂隙的长度。如图 9 所示,研究区内裂隙长度分布在 0.85~26.29m 之间,平均为 2.50m。裂隙的长度分布最多的区间为 0~1m,大多数分布在 3m 以内,大于 3m 的数量很少。3m 以内裂隙平均长度为 1.20m。结合测井资料,较长裂隙多分布在裂隙相对不发育层段,较短裂隙一般在局部集中发育,形成裂隙发育带。

3.6 裂隙的开度

通过对研究区内不同钻井的岩石薄片分析,共统计了 493 条雾迷山组裂隙。裂隙的开度于显微镜

下测量,误差为 $0.01\mu\text{m}$ 。总体上,裂隙开度最小为 $0.36\mu\text{m}$,最大为 $15000\mu\text{m}$,平均为 $147.24\mu\text{m}$ 。分布如图 10 所示,除了 1 条裂隙的开度达到 1.5cm,其余裂隙的开度均在 $5000\mu\text{m}$ 以内。裂隙的开度集中分布在 $10\sim 500\mu\text{m}$ 之间,此范围内平均开度为 $95.16\mu\text{m}$ 。印支运动晚期至喜马拉雅期是岩溶作用重要时期,岩溶作用对裂隙进行扩展,增大开度,为地下水提供了运移通道和储层空间。

3.7 裂隙的充填性质

充填物质的种类和多少直接影响裂隙的渗透性质。在研究区内常见的充填物主要有白云石、硅质、黄铁矿、泥质、石英、铁质、砂质等。同一口钻井中不

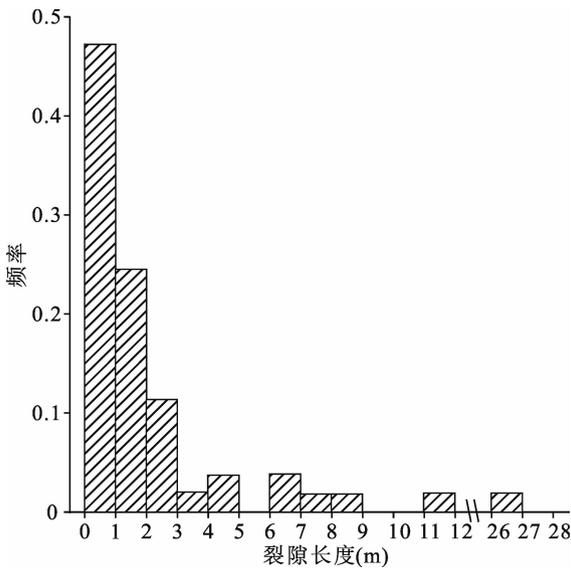


图9 雄安新区雾迷山组裂隙长度分布直方图
Fig. 9 Histogram of fracture length in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

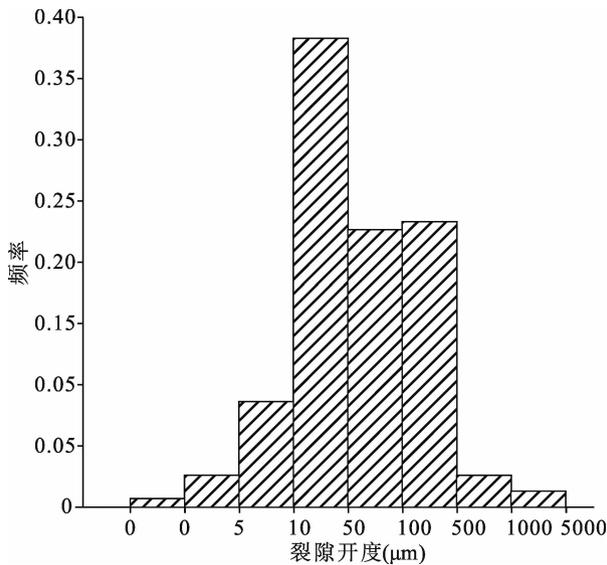


图10 雄安新区雾迷山组裂隙开度分布直方图
Fig. 10 Histogram of fracture aperture in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

同深度裂隙的充填性质亦不相同。有的被单一物质充填,有的被多种物质充填。N16井可见被硅质充填的构造缝;N18井中裂隙充填次生黄铁矿;N19井中有裂隙被砂质充填;N5井中可见大量构造缝被白云石充填。G22井中溶蚀构造缝被硅质、泥质、白云石等三种物质充填;Y14井中可见构造缝被硅质、白云石、黄铁矿充填;N7井中可见不同位置裂隙被不同的物质充填。

根据岩石薄片分析,493条裂隙中有451条含

有充填物。根据充填物质在裂隙中出现的频率,绘制了不同物质充填频率饼状图(图11),其中白云石出现的频率最大,达到了34.5%,其次是黄铁矿、石英、有机质和硅质,出现频率分别为20.5%、15.2%、8.0%和6.6%。其他的物质如砂质、方解石、绿泥石、石膏、萤石等占比均不足5%,极少充填于裂隙。

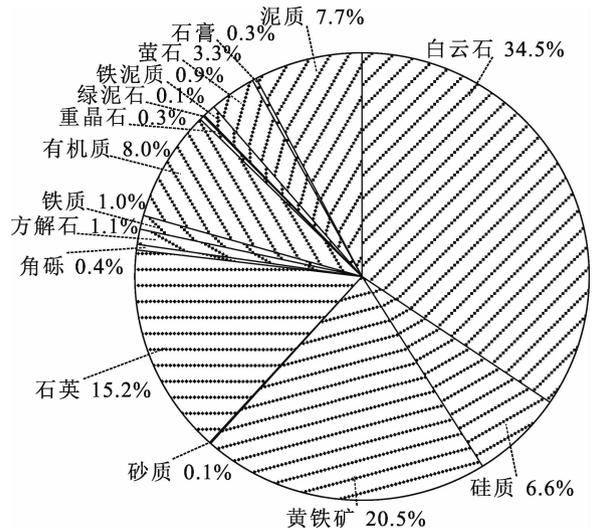


图11 雄安新区雾迷山组不同充填物质充填裂隙频率饼状图
Fig. 11 Pie graph of filling fractures frequency with different interstitial materials in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

在493条裂隙中,全充填的裂隙占比超过了半数,达到56.1%;其次是半充填裂隙达到了35.4%;最少的是未充填裂隙,占比为8.5%(图12)。结合充填物质类型发现,全充填裂隙大部分为白云石充填。全充填裂隙空间被充填物质全部占据,不具有水文地质意义。半充填和未充填裂隙留存有一定空间,具有导水储水潜力。总体上,虽然半充填和未充填的裂隙占比稍小,但是由于研究区内裂隙的基数庞大,数量仍然较多。

4 雾迷山组热储岩溶裂隙的连通性

裂隙只有处于相互连通的状态时,流体才能在其中流动形成储层。裂隙的连通程度与裂隙的方位、数目、长度、开度以及充填度等几何特征密不可分,裂隙的开启受到现今地应力方向影响。

通过钻井记录,发现研究区内多口钻井中存在岩溶裂隙非常发育的层位,形成了良好的储集空间。Y1井3321~3322m段、Y12井4181~4185m段、N37井865~885m段等裂隙非常发育,可见溶洞和

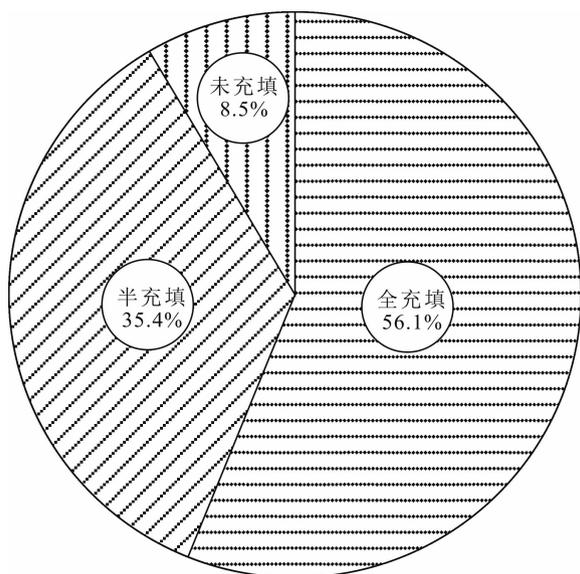


图 12 雄安新区雾迷山组裂隙充填程度分布饼状图
Fig. 12 Pie graph of filling degree of fractures in Wumishan Formation in Xiong'an New Area

裂隙。G24 井 3628~3765m 段存在多数溶洞沿着裂隙发育分布,上段以裂隙为主,下段以裂隙溶洞为主。N11 井 1373m 附近中发育有彼此连通的半充填构造缝。N7 井 1114~1274m 段裂隙孔洞非常发育,以半充填为主,可见两组交叉切割的层间裂隙和倾向裂隙。G11 井 2378~2681m 段以及其他井段中亦可见呈网状分布的裂隙,具有很好的连通性。

储层内部各组裂隙相互交错,发育孔洞,形成了良好的储层裂隙发育段。在岩溶裂隙非常发育的部位,钻井过程中会发生钻具放空和井液漏失等现象,前人研究发现该现象普遍存在于研究区及周围多孔钻井中(Lu Kai et al., 2019)。结合前文对岩溶裂隙几何特征的描述,裂隙带厚度较宽、间距较近,裂隙的长度、密度、开度等发育较好,含有数量较多的未充填和半充填的裂隙。综上所述,雄安新区雾迷山组储层具有良好的连通性。

通过测井中的正交偶极测量能够获取地层的横波各向异性,得到的快横波方位角与水平最大主应力方向平行。N5 井 6000m 附近的快横波方位角(图 13)为北东东向,即得到最大主应力方向,与裂隙的主要走向近北东向和近东西向非常接近,说明现今的地应力有利于裂隙的开启。除快横波方位角以外,地层中诱导缝的走向也与现今最大水平主应力方向平行,前人发现冀中坳陷雾迷山组中诱导缝的走向与裂隙相同或斜交,亦说明现今地应力方向有利于裂隙开启(Zhu Jiangwei, 2016)。

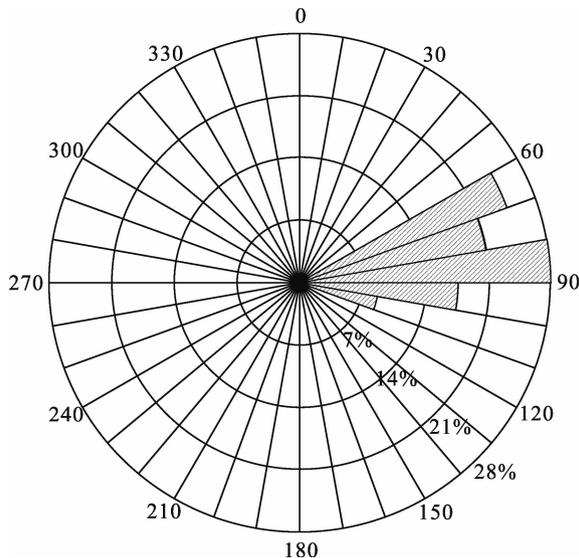


图 13 N5 井雾迷山组裂隙快横波方位角玫瑰花图
Fig. 13 Rose diagram of fast S-wave azimuth of Wumishan Formation in well N5

在测井显示上,裂隙发育带之间是致密带,导水性能较差,在整个雾迷山组内部,水化学性质接近,水化学类型相同,说明储层中各个裂隙带是连通的。推测连通方式可能为以下两种情况:一是通过雾迷山组边界的大断层进行地下水的传输;二是由于钻井是通过线的角度揭露地层,已揭露的裂隙发育带是成层状分布,在未揭露的地层可能存在高角度或者近垂直的裂隙相沟通。

此次用于分析研究的大多数钻井并未钻穿储层,揭露的信息多为雾迷山组上部的信息。根据上述有限资料分析得出雾迷山组岩溶裂隙的几何特征,构建出地热资源运移和储存的地质框架,为研究地热资源在雾迷山组储层中的分布与活动提供了有效参考。

5 结论

雄安新区雾迷山组储厚比为 41.90%,裂隙发育段在地层中占比较大。受应力场作用,储层内部裂隙走向与区域深大断裂相似,以近北东向和近东西向为主。裂隙密度较高,约 5~6 条/ m^2 ,裂隙平均长度为 1.20m,在局部地层中集中发育。受岩溶作用改造,裂隙平均开度为 95.16 μm 。裂隙中主要充填物为白云石、黄铁矿、石英等,有较多半充填和未充填裂隙。

雄安新区岩溶和裂隙的形成与构造活动密切相关,主要发生于雾迷山组沉积时期、芹峪运动短暂抬升时期、加里东运动稳定抬升时期、印支运动末至喜

马拉雅运动强烈构造活动时期。后期强烈的构造活动对储层改造最为有利,区域应力场和岩溶作用是岩溶裂隙形成的主控因素。

雄安新区雾迷山组地层中裂隙网络发育,现今地应力有助于裂隙的开启,储层内部连通性好,形成了地下热水的导水通道和储集空间,为研究区岩溶型地热资源的富集提供了优越条件。

References

- Axelsson G. 2010. Sustainable geothermal utilization—Case histories; definitions; research issues and modelling. *Geothermics*, 39(4): 283~291.
- Chang Jian, Qiu Nangsheng, Zhao Xianzheng, Xu Wei, Xu Qiuchen, Jin Fengming, Han Chunyuan, Ma Xuefeng, Dong Xiongying, Liang Xiaojuan. 2016. Present-day geothermal regime of the Jizhong depression in Bohai Bay basin, East China. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(3): 1003~1016 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang, Huang Geshan, Zhang Wenren, Zheng Rongyan, Liu Bingyi. 1982. The temperature distribution pattern and the utilization of geothermal water at Niutuozhen basement protrusion of central Hebei Province. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 239~252 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang, Wang Jiyang, Wang Ji'an, Deng Xiao, Yang Shuzhen, Xiong Liangping, Zhang Juming. 1990. The characteristics of the geothermal field and its formation mechanism in the north China down-faulted basin. *Acta Geologica Sinica*, 64(1): 80~91 (in Chinese with English abstract).
- China Geological Survey, Ministry of Natural Resources, Department of New and Renewable Energy, National Energy Administration, Institutes of Sciences and Development, Chinese Academy of Sciences, Institute of Resources and Environment Policies, Development Research Center of the State Council. 2018. *China Geothermal Energy Development Report (2018)*. Beijing: China Petrochemical Press, 1~27 (in Chinese).
- Cui Yue, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, Tang Boning, Guo Sasa. 2019. Radioactive heat production and terrestrial heat flow in the Xiong'an Area, North China. *Energies*, 12(4608): 1~23.
- Dai Minggang, Ma Pengpeng, Lei Haifei, Hu Jianguo, Guo Xinfeng, Zhang Jiayun, Bao Zhidong. 2020. Distribution characteristics and favorable targets of karst geothermal reservoir of Wumishan Formation in Xiong'an New Area. *Chinese Journal of Geology*, 55(2): 487~505 (in Chinese with English abstract).
- Feng Bin, Tian Bo, Han Dehui, Fang Dajun. 2003. Application of imaging logging technology on analysis of micro-fissures in the Zhuanghai area, Shengli oilfield. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 37(2): 254~258 (in Chinese with English abstract).
- Fridleifsson I B. 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(3): 299~312.
- Ghassemi A. 2012. A review of some rock mechanics issues in geothermal reservoir development. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(3): 647~664.
- Guo Sasa, Zhu Chuanqing, Qiu Nangsheng, Tang Boning, Zhang Jiatang, Zhao Yuhang. 2019. Present geothermal characteristics and influencing factors in the Xiong'an New Area, North China. *Energies*, 12(3884): 1~24.
- Huang Hua. 2008. Application of FMI well logging technology in carbonate reservoir of Tazhong oil field. *Resources Environment & Engineering*, 22(1): 92~95 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Song, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892~2910 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Haiyang, Wang Shuxing, Kang Fengxin, Shi Meng, Fan Zhenhua, Zhang Ling. 2019. Geologica characteristics and resources potential of dry-hot pore ZKCW01 in Wendeng, Shandong Povince. *Acta Geologica Sinica*, 93(s1): 217~225 (in Chinese with English abstract).
- Kömürçü M İ, Akpınar A. 2009. Importance of geothermal energy and its environmental effects in Turkey. *Renewable Energy*, 34(6): 1611~1615.
- Li Fei, Li Shaolong, Zeng Jianhui, Liu Jingwang, Liu Jia, Ge Daiwei, Wang Yang, Mu Yongjing. 2016. Feature of paleofluids and present fluids in the inner buried hill of Niutuozhen uplift, Baxian sag. *Geoscience*, 30(5): 1115~1133 (in Chinese with English abstract).
- Lin Li. 2006. Sustainable development and utilization of thermal groundwater resources in the geothermal reservoir of the Wumishan Group in Tianjin. Ph.D thesis of China University of Geosciences (Beijing), 17~24 (in Chinese with English abstract).
- Liu Juan. 2018. Reservoir characteristics and comprehensive evaluation of Wumishan Formation in Jizhong depression. Master's thesis of China University of Petroleum, Beijing, 9~53 (in Chinese with English abstract).
- Lu Kai, Bao Zhidong, Ji Hancheng, Liu Jinxia, Wang Guiling, Ma Feng, Guo Ruijing, Cao Yingzhuo, Yang Fei, Fu Yong, Li Xiaobo, Hua Yingxin, Que Yijuan, Li Zongfeng, Xu Xiting, Hu Xiancai. 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 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xingyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, Wang Yipeng. 1983. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China. *Acta Geologica Sinica*, (1): 24~34 (in Chinese with English abstract).
- Pang Zhonghe, Kong Yanlong, Pang Jumei, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2017. Geothermal Resources and Development in Xiong'an New Area. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, (11): 1224~1230 (in Chinese with English abstract).
- Qi Jiafu, Yu Fusheng, Lu Kezheng, Zhou Jianxun, Wang Ziyu, Yang Qiao. 2003. Conspectus on Mesozoic basins in Bohai bay province. *Earth Science Frontiers*, 10(suppl): 199~206 (in Chinese with English abstract).
- Sun Aiqun, Niu Shuyin. 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 (in Chinese with English abstract).
- Tang Boning, Zhu Chuanqing, Xu Ming, Chen Tiange, Hu Shengbiao. 2019. Thermal conductivity of sedimentary rocks in the Sichuan basin, Southwest China. *Energy Exploration & Exploitation*, 37(2): 691~720.
- Wang Zhuting, Jiang Guangzheng, Zhang Chao, Hu Jie, Shi Yizuo, Wang Yibo, Hu Shengbiao. 2019. Thermal regime of the lithosphere and geothermal potential in Xiong'an New Area. *Energy Exploration & Exploitation*, 37(2): 787~810.
- Xiang Yanyong. 2011. *Fundamental Theory of Groundwater Mechanics*. Beijing: Science Press, 97~124 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Yang, Liu Guoping, Han Chunyuan, Zhu Jiangwei, Zhou Congan, Lü Wenya, Gao Yuan, Zeng Lianbo, Ma Xuefeng. 2018. Development characteristics and main controlling factors of natural fractures in deep carbonate reservoirs in the Jizhong Depression. *Natural Gas Industry*, 38(11): 38~42 (in Chinese with English abstract).

- Xu Jie, Ji Fengjie. 2015. Structure and Evolution of Bohai Bay Basin Beijing: Seismological Press (in Chinese with English abstract).
- Yan Xiaoxue, Gan Haonan, Yue Gaofan. 2019. Hydrogeochemical characteristics and genesis of typical geothermal fields from Huangshadong to Conghua in Guangdong. *Geological Review*, 65(3): 743~754 (in Chinese with English abstract).
- Yang Haimeng, Dai Junsheng, Wang Bifeng, Juan Zou. 2014. Development process of Niutuozhen uplift. *Journal of Northeast Petroleum University*, 38(6): 22~29 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xunchang, Kang Fengxin, Wang Xuepeng, Fu Qingjie, Liu Zhitao. 2019. Hydrochemical features of geothermal reservoir geotemperature field in sandstone porosity and enrichment mechanism of geothermal water: a case study of geothermal reservoir of Guantao Formation in the Lubei. *Acta Geologica Sinica*, 93(3): 738~750 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2008. Lower crust and lithospheric mantle beneath the North China Craton before the Mesozoic lithospheric disruption. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2185~2204 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengen, Pan Baozhi, Zhang Xiaofeng, Xu Xinye, Liu Qianru. 2011. Application of FMI logging data in evaluation of heterogeneity reservoirs. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 50(6): 630~633 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaofeng. 2011. Study on quantitative characterization of borehole fractures and its application. Ph.D thesis of Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jiangwei. 2016. The study of fracture development rule of the typical buried-hills in the Jizhong depression. Master's thesis of Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 5~41 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, Liu Junlai. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton. *Sci China Earth Sci*, 41(5): 583~592 (in Chinese with English abstract).
- 黄华. 2008. FMI 成像测井技术在塔中碳酸盐岩中的应用. *资源环境与工程*, 22(1): 92~95.
- 姜光政, 高珊, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版). *地球物理学报*, 59(8): 2892~2910.
- 江海洋, 王树星, 康凤新, 史猛, 范振华, 张玲. 2019. 山东文登 ZKCW01 干热岩钻孔地质特征及资源潜力. *地质学报*, 93(S1): 217~225.
- 李飞, 李少龙, 曾澍辉, 刘井旺, 刘佳, 葛黛薇, 王阳, 穆永晶. 2016. 霸县凹陷牛驼镇凸起潜山内幕古流体和现今流体特征研究. *现代地质*, 30(5): 1115~1123, 1133.
- 林黎. 2006. 天津地区雾迷山组热储地下水水资源可持续开发利用研究. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文, 17~24.
- 柳娟. 2018. 冀中拗陷雾迷山组储层特征及综合评价. 北京: 中国石油大学(北京)硕士学位论文, 9~53.
- 鲁轲, 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*, (6): 885~900.
- 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 汪一鹏. 1983. 中国东部中-新生代裂陷作用和伸展构造. *地质学报*, (1): 24~34.
- 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 胡圣标, 汪集暘. 2017. 雄安新区地热资源与开发利用研究. *中国科学院院刊*, (11): 1224~1230.
- 漆家福, 于福生, 陆克政, 周建勋, 王子煜, 杨桥. 2003. 渤海湾地区的中生代盆地构造概论. *地质学前沿*, 10: 199~206.
- 孙爱群, 牛树银. 2000. 地幔热柱演化及其地热效应——华北地热异常的深部构造背景. *地球学报*, (2): 71~78.
- 项彦勇. 2011. 地下水力学概论. 北京: 科学出版社.
- 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. 冀中拗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.
- 徐杰, 计凤桔. 2015. 渤海湾盆地构造及其演化. 北京: 地震出版社.
- 闫晓雪, 甘浩男, 岳高凡. 2019. 广东惠州—从化典型地热田水文地球化学特征及成因分析. *地质论评*, 65(3): 743~754.
- 杨海盟, 戴俊生, 汪必峰, 邹娟. 2014. 牛驼镇凸起发育过程. *东北石油大学学报*, 38(6): 22~29.
- 杨询昌, 康凤新, 王学鹏, 付庆杰, 刘志涛. 2019. 砂岩孔隙热储地温场水化学场特征及地热水富集机理——鲁北馆陶组热储典型案例. *地质学报*, 93(3): 738~750.
- 翟明国. 2008. 华北克拉通中生代破坏前的岩石圈地幔与下地壳. *岩石学报*, (10): 2185~2204.
- 张程恩, 潘保芝, 张晓峰, 徐新也, 刘倩茹. 2011. FMI 测井资料在非均质储层评价中的应用. *石油物探*, 50(6): 630~633.
- 张晓峰. 2011. 井中裂缝的定量表征及其应用研究. 长春: 吉林大学博士学位论文.
- 朱姜伟. 2016. 冀中拗陷典型潜山裂缝发育规律研究. 北京: 中国石油大学(北京)硕士学位论文.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学: 地球科学*, 41(5): 583~592.
- 自然资源部中国地质调查局, 国家能源局新能源和可再生能源司, 中国科学院科技战略咨询研究院, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. 2018. 中国地热能发展报告(2018). 北京: 中国石化出版社, 1~27.

参 考 文 献

- 常健, 邱楠生, 赵贤正, 许威, 徐秋晨, 金凤鸣, 韩春元, 马学峰, 董雄英. 2016. 渤海湾盆地冀中拗陷现今地热特征. *地球物理学报*, 59(3): 1003~1016.
- 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*, (3): 239~252.
- 陈墨香, 汪集暘, 汪缙安, 邓孝, 杨淑贞, 熊亮萍, 张菊明. 1990. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制. *地质学报*, 64(1): 80~91.
- 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): 485~505.
- 冯斌, 田波, 韩德辉, 方大钧. 2003. 成像测井技术在胜利油田桩海地区微裂隙构造分析中的应用. *浙江大学学报(工学版)*, 37(2): 254~258.

Characteristics of the karst thermal reservoir in the Wumishan Formation in the Xiong'an New Area

TANG Boning^{1,2)}, ZHU Chuanqing^{*1,2)}, QIU Nansheng^{1,2)}, CUI Yue^{1,2)}, GUO Sasa^{1,2)}, CHEN Chi^{1,2)}

1) *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, 102249;*

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

** Corresponding author: zhucq@cup.edu.cn*

Abstract

The carbonate rock karst thermal reservoir in the Xiong'an New Area is a high-quality geothermal resource with significant development potential. Clarifying characteristics of the formation, evolution and development of karst fractures in the Wumishan Formation reservoir plays an important role in studying the formation and accumulation of geothermal resources, and is a prerequisite for the rational and effective exploitation of geothermal resources. Based on previous studies, the formation process of the Wumishan Formation, and geometric features of the karst fractures have been analyzed in detail based on data from outcrops, core sampling, rock slices, drilling, and well logging. The results show that the formation of karst and fractures in the Xiong'an New Area is closely related to tectonic activities, especially during the period from the late Indosinian movement to the Himalayan movement. During this period, the most favorable karst was formed. The average thickness and average interval of fracture zones are 4.70 m and 4.05 m, respectively, and the average proportion of reservoir thickness is 41.90%. The trend of internal fractures in the reservoir is mainly north-east and the dip angle is mainly between 50° and 90°. The fracture frequency per area is 5.34 pieces/m². The average length and opening of fractures are 1.20 m and 95.16 μm, respectively. There are many types of filling materials in fractures, with dolomites, pyrites and quartzs being the most common. The formation contains lots of semi-filled and unfilled fractures. Present ground stress helps to open fractures, and the fracture network is developed in the reservoir with good connectivity, which has a very good water-conducting and water-storing performance and provides good conditions for the enrichment of geothermal resources in the reservoir.

Key words: The Xiong'an New Area; The Wumishan Formation; karst and fractures; formation and evolution; geometric characteristics