

华北北部地区蓟县系高于庄组-雾迷山组白云岩储层特征与形成主控因素

李朋威¹, 何治亮², 罗平³, 金廷福⁴, 张英¹, 冯建赞¹, 宋金民⁴, 徐士林¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728;

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059)

摘要:华北北部地区蓟县系高于庄组-雾迷山组白云岩储层以岩石与储集空间类型多样、孔隙结构与受控因素复杂以及非均质性强为特征,并由此制约了该区油气和地热等资源的勘探与开发。以野外露头和岩心为研究对象,开展了大量的野外地质考察、岩心观察、薄片鉴定与物性分析等研究工作,进一步总结分析了高于庄组-雾迷山组白云岩储层特征及其优质储层形成主控因素。研究表明,高于庄组-雾迷山组发育一套以微生物白云岩为主的储层类型,岩石结构构造复杂,其中,锥状叠层石和凝块石为其最有利的储集岩石类型。按照储集空间组合,可将储层划分为孔洞缝复合型、裂缝-孔隙型和孔隙型3种类型。其中,蓟县系雾迷山组白云岩储层以孔洞缝复合型为主,物性最好;高于庄组则以裂缝-孔隙型和孔隙型为主,物性相对较差。综合分析认为,研究区高于庄组-雾迷山组规模优质白云岩储层是多种因素耦合作用的结果,其中微生物礁滩、印支期以来的构造隆升、破裂及溶蚀作用为其形成主控因素。

关键词:微生物岩;白云岩储层;高于庄组;雾迷山组;蓟县系;华北北部地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics of and main factors controlling the dolomite reservoir of Gaoyuzhuang-Wumishan Formations in the Jixian System, the north of North China

Li Pengwei¹, He Zhiliang², Luo Ping³, Jin Tingfu⁴, Zhang Ying¹, Feng Jianyun¹, Song Jinmin⁴, Xu Shilin¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

4. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The dolomite reservoirs of Gaoyuzhuang-Wumishan Formations in North China are characterized by strong variety in reservoir rock types and pore space types, which are controlled by complex factors and caused strong heterogeneity in reservoir quality. They in turn seriously hinders the exploration and development of oil-gas and geothermal resources in this area. The study comprehensively analyzes and summarizes the characteristics of dolomite reservoirs and main factors controlling the formation of high-quality reservoirs in this area. Observations and studies are carried out on both outcrops and cores through large number of field geological surveys and core observation, thin section identification and physical property analyses. The results show that the reservoirs dominated by microbiological dolomites with complex textures and structures were developed herein, among which the coniform stromatolites and thrombolites are the most favorable rocks for reservoir. According to the pattern of reservoir space assemblages, the reservoirs could be categorized into 3 types: composite pore-cavity-fissure reservoir, fissure-pore reservoir and pore reservoir. Among them, the Wumishan Formation in the Jixian System are dominated by the composite pore-cavity-fissure type, relatively better in physical property. Whereas the Gaoyuzhuang Formation are of typical fissure-pore and pore types, relatively poorer in reservoir property. In conclusion, multiple factors contribute to the formation of large-scale high-quality dolomite reservoirs in the study area,

收稿日期:2019-07-22;修订日期:2019-11-09。

第一作者简介:李朋威(1983—),男,博士、高级工程师,沉积与储层地质研究。E-mail:lipw_syky@sinopec.com。

通讯作者简介:何治亮(1963—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail:hezl_syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U1663209);国家科技重点专项(2017ZX05005-002-009);中国科学院A类战略性先导项目(XDA14010201)。

with the microbiological reef-shoal facies, as well as the Indosinian tectonic uplifting, fracturing and dissolution, as the main factors leading to better reservoir quality.

Key words: microbialite, dolomite reservoir, Gaoyuzhuang Formation, Wumishan Formation, Jixian System, the north of North China

1975年,任丘潜山油气藏的发现为冀中拗陷中、新元古界碳酸盐岩油气勘探拉开了序幕。到目前为止,冀中拗陷潜山已经经历了40多年的勘探历程,并发现了一系列的潜山油气藏^[1-4]。根据冀中拗陷油气探明储量报告,潜山油气藏中石油与天然气探明储量分别为 5×10^8 t和 180×10^8 m³,分别占该区石油与天然气探明总储量的一半以上^[5]。统计表明,这些油气资源大多赋存于冀中拗陷蓟县系高于庄组(Jxg)与雾迷山组(Jxw)白云岩储层中^[5-7]。同时,地热资源勘查结果表明,冀中拗陷潜山中亦蕴藏有丰富的岩溶地热资源^[8-9],其中雄县(牛驼镇凸起)地热田即为典型的代表,其热储主要为蓟县系雾迷山组白云岩热储^[10-11]。据统计,冀中拗陷潜山地热田的热储温度最高可达110℃以上,热储单井产量可达120 m³/h以上^[12]。因此,冀中拗陷蓟县系高于庄组-雾迷山组白云岩储层不仅蕴藏有大量的油气资源,同时也蕴藏有丰富的地热资源,表明华北北部地区高于庄-雾迷山组发育有规模的优质白云岩储层。

根据前人研究,华北北部地区高于庄组-雾迷山组发育有风化壳型和内幕型两种白云岩储层类型,以岩石类型与储集空间类型多样、孔隙结构与受控因素复杂以及非均质性强为特征^[3,5-7,12-14]。为了进一步查明该区高于庄组-雾迷山组碳酸盐岩储层特征,本项目在前人研究的基础上,以蓟县周边露头区为主要研究对象,结合任丘潜山部分取心段,开展了野外露头地质考察、岩心观察、镜下鉴定与孔渗分析等研究工作,明确了高于庄组-雾迷山组优质白云岩储层类型及其形成主控因素。

1 区域地质概况

华北板块的形成与演化可划分为结晶基底形成阶段、盖层发展阶段和地壳强烈活动阶段^[15]。根据区域地层对比可知,华北板块中新元古界地层发育相对完整,区域上具有相似的沉积构造背景,主要形成于盖层发展的早期阶段,为一套巨厚的碎屑岩和碳酸盐岩沉积建造(图1a,b)。根据华北板块晚长城世-蓟县纪古地理格局,这一时期的碳酸盐岩主要形成于燕辽拗拉槽地带,呈北东向的带状展布(图1c),其沉积环境主要为潮坪相至较深水环境^[16]。蓟县地区为其沉积中心,根据地层厚度统计,蓟县系高于庄组最厚可达

1 500 m以上,雾迷山组最厚可达3 000 m以上。

蓟县地区中、新元古界地层出露连续、界线清楚,多年来一直是国内外地质学家研究前寒武纪地层重要的层型剖面。根据最新的地层精确定年和区域地层对比,研究区中新元古界顶部多套地层有缺失。其中,铁岭组与下马岭组、下马岭组与长龙山组之间及井儿峪组顶部均有不同程度的沉积缺失^[17]。按照最新的地层划分方案,中新元古界可划分为4个系、12个组,其中1个系待定^[17](图1b)。中元古界蓟县系雾迷山组和高于庄组为一套巨厚的碳酸盐岩地层^[18],其中雾迷山组已基本被白云石化,高于庄组部分白云石化。

2 白云岩储层特征

2.1 岩石学特征

纵观蓟县地区中、新元古界岩性分布特征,白云岩主要发育于蓟县系雾迷山组,而高于庄组局部层段白云石化(下部为主),其他层系以灰岩为主或碳酸盐岩不甚发育。

通过大量的岩石露头与镜下观察,发现研究区高于庄组-雾迷山组白云岩具有类型多样和结构构造复杂的特征。其中,雾迷山组以大量发育的微生物白云岩为特征,可见叠层石、层纹石、均一石、凝块石和核形石等微生物岩类型(图2a—g),其中叠层石按形态又可划分为柱状、锥状、丘状、层状和波状等类型,并以丘状、层状和波状为主。岩石结构以亮暗相间的纹层、凝块、核形石和似球粒等为特征(图3a—f)。其中,叠层石纹层呈连续或断续分布,纹层宽度为0.01~0.5 mm不等;凝块多为斑状或不规则状,凝块间常为亮晶胶结;核形石呈球状、椭球状或不规则状,具有同心圈层构造;球粒大小较均匀,呈圆或椭圆状,色暗富含有机质。除此之外,还可见硅质条带状白云岩、砂砾屑白云岩与晶粒白云岩等(图2h,图3h—i)。相比雾迷山组,高于庄组白云岩类型相对单一,可见大量发育微生物白云岩,但主要以层状和微波状叠层石为主,另外,可见硅质条带或结核状白云岩等(图2i)。

2.2 储集空间与组合特征

2.2.1 储集空间类型

研究表明,蓟县系高于庄组-雾迷山组尤其是雾

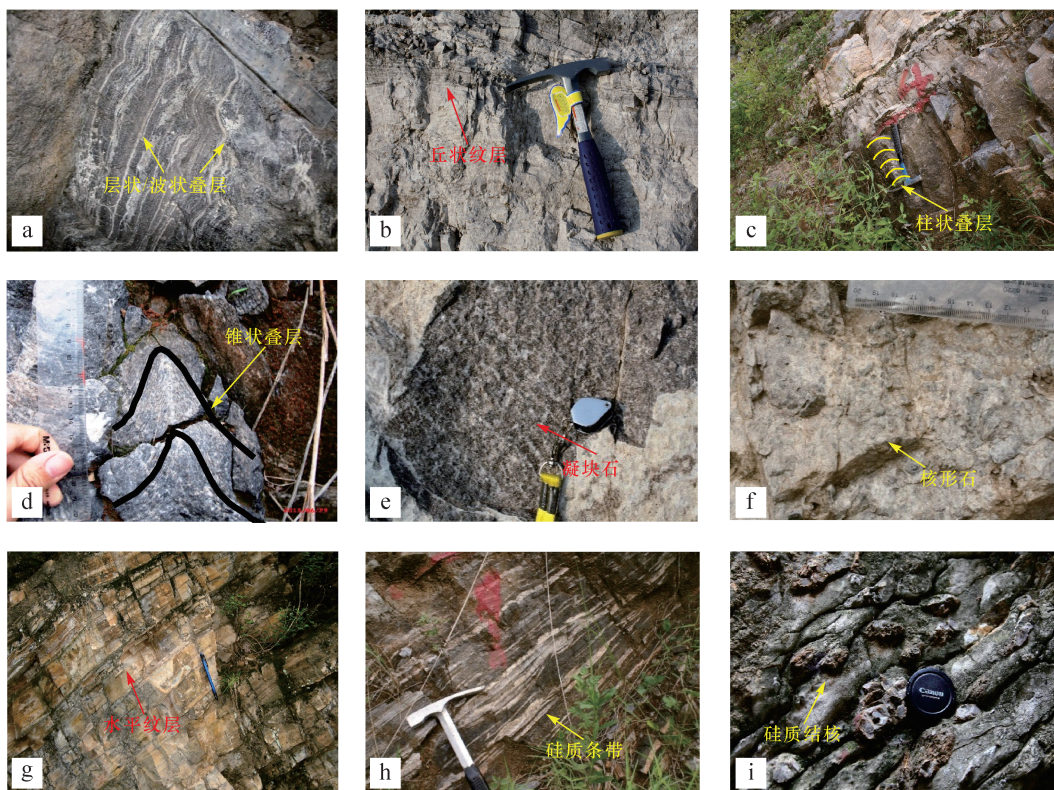


图 2 天津蓟县地区蓟县系高于庄组-雾迷山组白云岩宏观特征

Fig. 2 Macroscopic features of the Gaoyuzhuang-Wumishan dolomites in the Jixian System of Jixian County, Tianjin

a. (微)波状叠层石白云岩,纹层呈波状,连续或断续分布,Jxw;b. 丘状叠层石白云岩,纹层呈丘状凸起,连续分布,Jxw;c. 小型柱状叠层石,纹层呈丘状凸起,断续分布,Jxw;d. 锥状叠层石白云岩,纹层呈锥状凸起,断续或连续分布,Jxw;e. 凝块石白云岩,凝块呈深灰色的不规则状,Jxw;f. 核形石白云岩,核形石呈球状、椭球状或不规则状,Jxw;g. 层纹石白云岩,纹层呈水平状连续分布,Jxg;h. 硅质条带状白云岩,Jxw;i. 结核状白云岩,硅质结核呈椭球体或不规则状,Jxg

2.2.2 储集空间组合与分布特征

按照储集空间组合特征,可将高于庄组-雾迷山组白云岩储层划分为孔洞缝复合型、裂缝-孔隙型和孔隙型 3 种类型。根据丁连湖^[21](2002)统计结果表明,蓟县系雾迷山组白云岩储层以孔洞缝复合型为主,其中任丘、雁翎和留北等潜山油气储层均为这种类型,其次为孔隙型和裂缝-孔隙型;而高于庄组主要发育裂缝-孔隙型和孔隙型两种类型(表 1)。

在垂向上,储层分布具有一定的规律性。其中,孔洞缝复合型储层主要发育于 2 000 ~ 3 500 m 深处,属于中等埋藏深度,而裂缝孔隙型和孔隙型储层则一般发育于 3 500 m 以深的深层。对于同一个白云岩储集体来说,在纵向上具有明显的分带性。以任丘潜山油气储层为例,在纵向上可划分为 3 个带:蚀孔洞缝发育带、小型溶蚀孔洞发育带和溶蚀孔发育带^[13]。其中,大型溶蚀孔洞缝发育带发育于储集体的上部,并沿断层分布,钻井过程中发生了大量的放空、漏失和扩

径现象;小型溶蚀孔洞发育带发育于储集体的中部,顺层分布;溶蚀孔发育带则发育于储集体的下部,顺层分布(图 5)。

2.3 孔、渗特征

根据物性统计结果,蓟县系雾迷山组白云岩储层物性最好,其孔隙度平均值为 2.3%,最大值为 9.4%,渗透率平均值为 $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大可达 $45.90 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;蓟县系杨庄组、高于庄组和长城系团山子组孔渗相差不大,储层品质整体要比雾迷山组差(表 2),同时,杨庄组和团山子组碳酸盐岩地层较薄,储层发育的物质基础较差。因此,蓟县系雾迷山组白云岩储层为研究区最好的储层。

在储集岩石类型上,物性与含油性也表现出一定的差异性。根据余家仁等^[13](1998)对任丘油田蓟县系雾迷山组岩性与物性统计结果,凝块石和锥状叠层石白云岩平均孔隙度最大,分别为 3.56% 和 3.33%,为研究区最好的储集岩石类型,而层纹石白云岩、泥粉晶白云岩、砂砾屑白云岩和泥质白云岩的平均孔

隙度均不超过2%,同时,孔隙度越大,其含油率也越大(图6)。综上表明,凝块石和锥状叠层石白云岩为研究区最有利油气储层岩石类型,并在一定程度上控制着油气的分布。

3 主控因素分析

综合沉积、成岩与构造作用对高于庄组-雾迷山组白云岩储层形成的影响,认为制约储层形成的因素主要有沉积相、白云石化、溶蚀、重结晶、压实压溶和充填胶结等成岩作用及构造破裂作用等,其中,规模优质白云岩储层的形成主要受控于微生物礁滩、印支期以来的构造隆升与破裂作用及溶蚀作用,为多种有利因素耦合作用的结果。

3.1 相控与微生物结构

根据前文所述,在储集岩石类型中,凝块石和锥状叠层石白云岩具有较高的孔隙度和含油性,层纹石白

云岩、泥粉晶白云岩、砂砾屑白云岩和泥质白云岩孔隙度较低,含油性也相对较差。关于微生物岩的形成环境,前人研究认为层状、波状、锥状或锥柱状叠层石反映了水体能量由弱变强的变化^[22-25],层状叠层石形成于低能环境,发育于浪基面以下或潮间带;锥状或锥柱状叠层石形成于高能环境,位于朝下带的上部或部分潮间带环境;而波状叠层石形成环境介于层状和锥柱状叠层石之间^[23,26]。核形石认为是安静环境下的产物,可能沉积于潟湖或水下洼地等低能环境^[23]。而关于凝块石的沉积环境,则存在一定的争议。赵澄林等(2003)认为凝块石没有水动力改造特征应与核形石具有相似的沉积环境;余家仁等^[13](1998)、金廷福^[12](2014)等则认为凝块石与锥状叠层石、核形石形成于近岸潮下带及邻近低潮面附近的礁滩相,属于高能环境。在露头上,凝块石往往呈厚层块状产出,内部成层性差,具有一定的丘状建隆构造,并可见锥状或锥柱状叠层石与其共生,同时镜下观察发现凝块石往往为亮晶胶结,因此,认为凝块石应形成于高能环境。

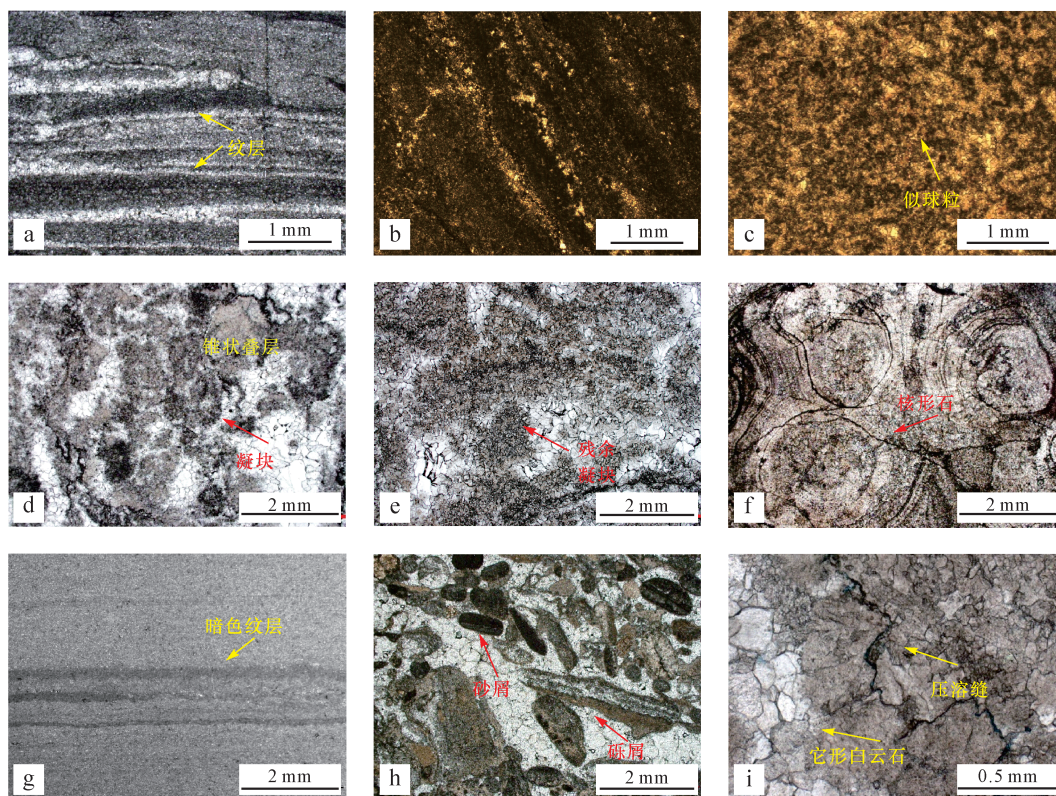


图3 天津蓟县地区蓟县系高于庄组-雾迷山组白云岩微观特征

Fig. 3 Microscopic features of the Gaoyuzhuang-Wumishan dolomites in the Jixian System of Jixian County, Tianjin

a. 亮暗相间纹层,暗色纹层较厚,为0.2~0.5 mm,亮色纹层一般小于0.3 mm,叠层石白云岩,Jxw;b. 由连续叠层生长的暗层和亮层组成,纹层宽0.01~0.1 mm不等,层纹石,Jxg;c. 似球粒泥晶结构,大小较均匀,呈圆或椭圆状,色暗富含有机质,Jxw;d. 凝块结构,凝块多为斑状或不规则状,亮晶胶结,凝块石白云岩,Jxw;e. 残余凝块结构,凝块边缘较为模糊,亮晶胶结,残余凝块石白云岩,Jxw;f. 核形石结构,具同心圈层,其直径一般大于2 mm,核形石白云岩,Jxw;g. 纹层状泥晶白云岩,纹层不甚发育,近水平状,Jxw;h. 砂砾屑白云岩,亮晶胶结,Jxw;i. 残余凝块细-中晶白云岩,白云石以它型为主,可见锯齿状压溶缝,Jxw

综合考虑凝块石的宏观形态及其内部结构特征,凝块石应属于微生物礁的产物(图 7)。凝块石作为微生物礁体产出并不罕见,美国阿拉巴马州上侏罗统油田 Smackover 组非常重要的储集体即为凝块石礁^[27]。

综合以上分析,高于庄组 – 雾迷山组白云岩储层的形成具有明显的相控作用,其中凝块石和锥状叠层石等有利储集岩石主要形成于微生物礁或相对高能环境中。

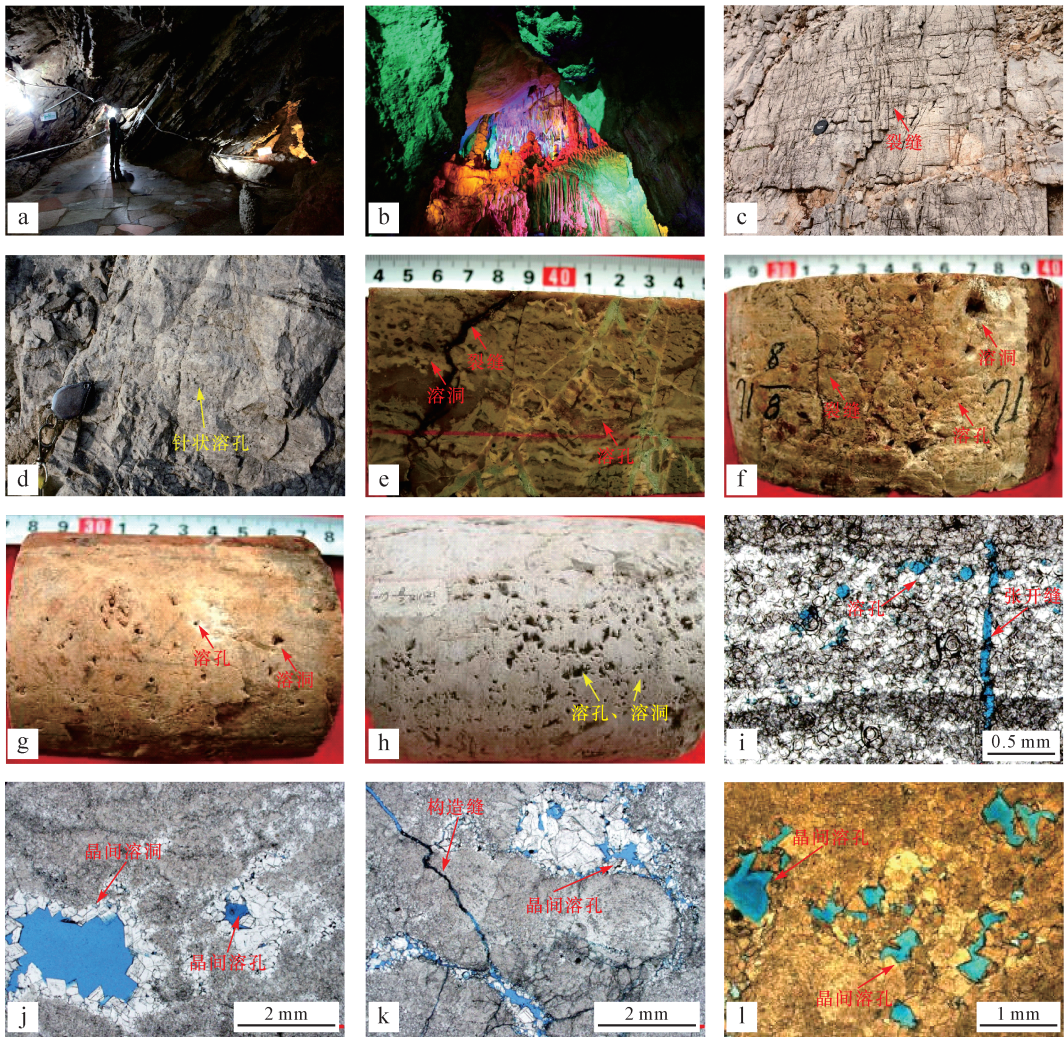


图 4 华北北部地区蓟县系高于庄组 – 雾迷山组白云岩储层宏观与微观特征

Fig. 4 Macro- and micro-scopic features of the Gaoyuzhuang-Wumishan dolomite reservoirs in the Jixian System in the north of North China
a. 岩溶洞穴,沿断裂发育,京东大溶洞,Jxg;b. 岩溶洞穴,沿断裂发育,蓟州溶洞,Jxw; c. 裂缝系统,至少可识别出 2~3 组裂缝,其中 2 组近垂直,蓟县双洞背斜,Jxw;d. 针状溶孔,沿纹层发育,层状叠层石,Jxw;e. 微生物格架相关孔隙,主要沿亮色纹层发育,丘状叠层石,Jxw;f. 小型溶蚀孔洞,可见裂缝,Y33 井,Jxw;g. 溶蚀孔洞发育,M41 井,Jxw;h. 溶蚀孔洞,GH1 井,Jxw;i. 溶蚀孔与裂缝,叠层石白云岩,Jxw;j. 晶间溶蚀孔洞,残余凝块白云岩,蓟县,Jxw;k. 晶间溶孔与构造缝,残余凝块白云岩,蓟县,Jxw;l. 晶间溶孔洞,残余凝块晶粒白云岩,R28 井,Jxw

表 1 冀中坳陷蓟县系高于庄组 – 雾迷山组潜山碳酸盐岩储层类型统计(据文献[21],修改)

Table 1 Types of the buried-hill carbonate reservoirs in the Gaoyuzhuang-Wumishan Formations in the Jixian System, Jizhong Depression(modified after reference[21])			
储层类型	缝洞孔复合型	微缝孔隙型	孔隙型
分布地区			
雾迷山组	任丘、莫东、雁翎、薛庄、留北	大王庄东	八里庄、八里庄西
高于庄组	—	梁村	河间
气藏数量/个	5	13	3
埋藏深度/m	2 000 ~3 500	>3 500	—

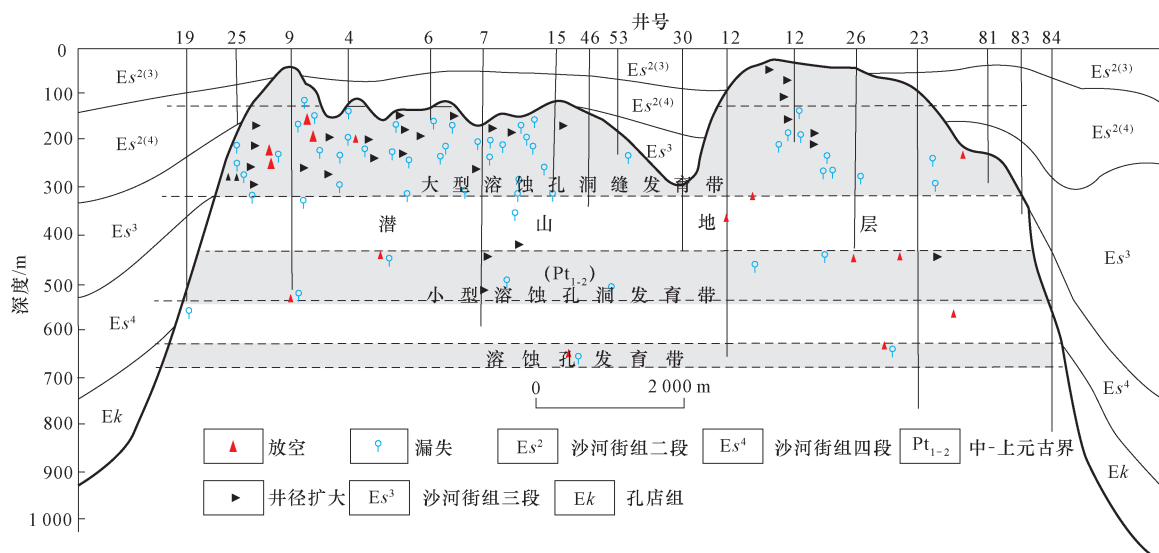


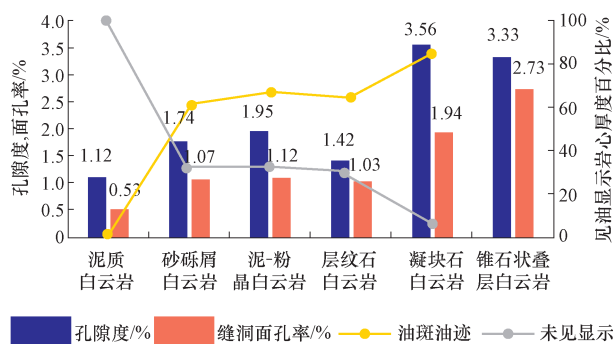
图5 任丘油田潜山岩溶垂向分布(据文献[13],修改)

Fig.5 The vertical distribution of karstification in the buried hill of Renqiu oilfield(modified after reference[13])

表2 中、新元古界主要碳酸盐岩储层孔、渗特征

Table 2 Porosity and permeability characteristics of the major Middle-to-Upper Proterozoic carbonate reservoirs

储层		岩性	孔隙度/%			渗透率/(10 ⁻³ μm ²)			样品数/个
			最小	最大	平均	最小	最大	平均	
青白口系	景儿峪组	灰岩	0.53	5.63	4.33	<0.01	0.02	0.08	3
	铁岭组	灰岩	0.90	2.14	1.52	0.01	0.09	0.05	2
蓟县系	雾迷山组	白云岩	0.48	9.40	2.30	<0.01	45.90	0.25	50
	杨庄组	白云岩	1.50	4.30	2.20	<0.01	6.70	0.05	9
	高于庄组	白云岩	0.27	5.31	2.18	<0.01	0.57	0.05	20
长城系	团山子组	白云岩	1.10	8.50	1.50	<0.01	0.58	0.06	5

图6 任丘油田雾迷山组储集岩物性与含油性统计直方图
(数据据文献[13])Fig.6 The statistical histogram of the porosity and oil saturation of the Wumishan reservoir rocks in Renqiu oilfield
(source after reference[13])

凝块石白云岩和锥状叠层石白云岩之所以具有相对较高的物性,分析认为与高能环境下所形成的微生物结构构造有关。凝块石白云岩多为亮晶胶结,且经白云石化后晶粒一般较粗,有利于晶间孔和晶间溶孔的形成(图4j-i),而锥状叠层石白云岩由于纹层呈锥

状凸起,在成岩早期便形成坚硬的格架,为后期溶蚀孔隙的形成与保存提供了有利的条件(图4e)。

3.2 溶蚀作用

研究区高于庄组-雾迷山组碳酸盐岩储层主要经历了白云石化、压实与压溶、重结晶以及表生与埋藏溶蚀等复杂的成岩作用。其中,白云石化和重结晶作用具有明显的双重作用,压实-压溶与充填胶结作用以减孔作用为主,而溶蚀作用,包括表生岩溶、深部酸溶蚀和岩溶热水的溶蚀做则是高于庄组-雾迷山组优质白云岩储层形成的又一关键因素。

3.2.1 表生岩溶作用

据统计,华北地区中、新元古界地层先后经历了杨庄期、凌源期、芹峪期、蓟县期、怀远期、加里东期-海西期、印支期和燕山期-喜马拉雅期8个岩溶期(表3),但是不同岩溶期由于构造运动性质、气候条件和持续时间的差异,所发生的岩溶作用强度不同,对储层的改造作用也就不同。

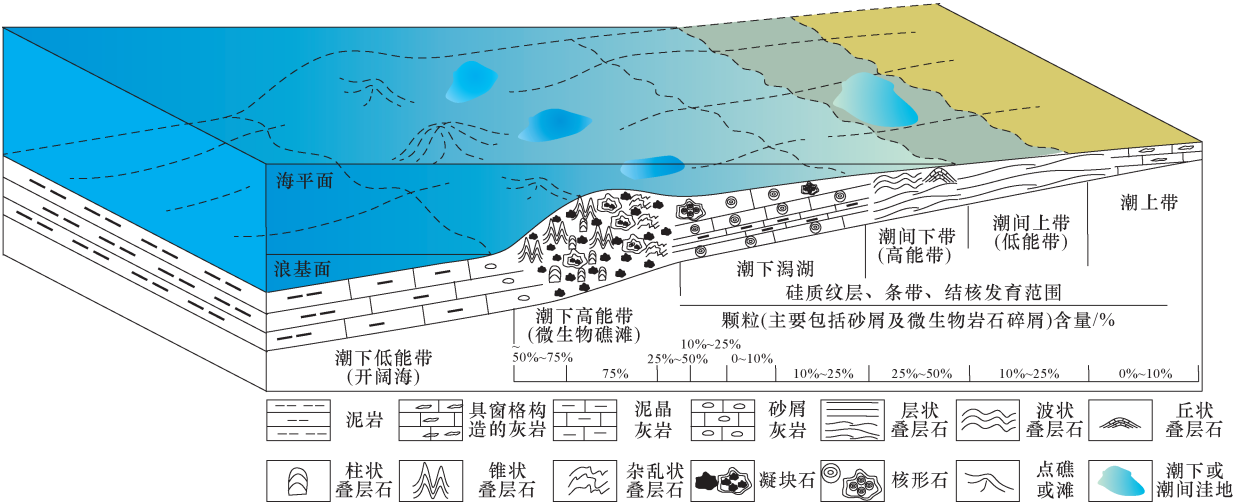


图 7 华北北部地区蓟县系高于庄组 – 雾迷山组微生物岩沉积模式

Fig. 7 The sedimentary model of the Gaoyuzhuang-Wumishan microbiolites in the Jixian System, the north of North China

表 3 华北地区中、新元古界 – 下古生界风化壳岩溶旋回(据文献①,修改)

Table 3 Karstification cycles of the Middle-to-Upper Proterozoic and Lower Paleozoic weathered crusts in North China (modified after reference①)

岩溶期	运动性质	岩溶的地层	古气候	延续时间/Ma	储层发育情况
燕山期 – 喜马拉雅期	褶皱、断裂	Ar—O ₂	干热温湿相间	100	储集条件好
印支期	褶皱、断开	O ₂	干热为主	50	储集条件差
加里东期 – 海西期		O ₂	温暖潮湿	150	
怀远运动期		亮甲山组	—	—	
蓟县期	升降运动	景儿峪组泥灰岩	?	260	均填满了上覆层的沉积物,储集条件不佳
芹峪期		铁岭组灰岩	温暖潮湿	短	
凌源期		雾迷山组白云岩	干热	短	
杨庄期		高于庄组白云岩	干热	短	

加里东期 – 海西期及其以前的构造运动以整体升降为主,断裂和裂缝不甚发育,岩溶作用主要发生在地层的表层,所形成的风化壳厚度也较薄。其中,这一时期高于庄组 – 雾迷山组白云岩储层表生岩溶作用主要与杨庄和凌源运动有关,但这两个时期均为干热环境,且持续时间短,同时这一时期形成溶蚀孔洞往往被后期沉积物所充填,因此很难形成规模的优质白云岩储层。

印支期 – 燕山期以来,华北地台发生了强烈的褶皱和块断运动,并形成了大量的裂缝,为高于庄组 – 雾迷山组白云岩储层的主要造缝阶段。强烈褶皱和断块运动导致高于庄组 – 雾迷山组碳酸盐岩地层遭受不同程度的暴露、剥蚀及溶蚀作用,燕山期 – 喜马拉雅期干热温湿相间环境更有利于岩溶作用的发生,同时裂缝的发育加剧了溶蚀作用的深度和强度,并由此产生了大量的溶蚀孔洞。另外,这一时期岩溶作用时间较长,又为晚期形成,不易被充填或充填完全,因此,认为这一

时期是高于庄组 – 雾迷山组古风化壳岩溶储层形成的主要阶段。

3.2.2 深部酸溶蚀作用

主要指石炭系、二叠系沉积后直至喜马拉雅期,压实水、干酪根转化形成的酸性水造成的溶蚀作用。同时,可能还存在深部富含 H₂S 和 CO₂ 等酸性流体对碳酸盐岩储层的溶蚀作用。深部溶解作用通常优先发生于裂缝、角砾间残存孔隙或微孔隙较发育的岩石中,使各类储集空间溶蚀扩大,是潜山内幕储层的形成的重要因素。

3.2.3 地热水溶蚀作用

深层岩溶热储中地热水的溶蚀作用主要存在两种形式:不同来源热水体混合而引起的溶蚀作用(混合溶蚀)和深层热水沿断裂上涌过程中由于温度降低而引起的溶蚀作用(逆转溶蚀)。研究表明,地下两种饱和

① 史卜庆. 渤海湾盆地油气藏与前景[R]. 中国石油勘探开发研究院,2002.

热水混合后会形成不饱和热水,从而增加了热水的溶蚀能力^[28];而深层饱和热水在沿断裂向上运移过程中由于温度的降低也会形成不饱和热水,进而也能增加热水的溶蚀能力^[28-30]。Palmer (1991), Dublyansky (2000) 和 Goldscheider 等(2010)多位学者强调了地热水溶蚀作用在深层碳酸盐岩储层形成中的重要性^[28-30]。关于碳酸盐岩的溶蚀模拟实验,国内外许多学者都做了研究,但大多实验都是在相对理想状态下开展的。考虑到地下地质条件的复杂性,范明等(2011)通过逼近真实的地质作用过程开展了岩溶模拟实验,实验结果表明深层碳酸盐岩存在一定的“溶蚀窗”,即在一定的温度范围(60 ~ 120 °C)(或深度)内碳酸盐岩溶蚀率达到一个最高的水平,当温度小于60 °C或高于120 °C时溶蚀率迅速降低^[31]。但是这种溶蚀窗和前面提到的地热水的溶蚀作用在机理上是否存在相关性还有待深入研究。

通过对储层中次生矿物和地下热水的分析,认为地下热水对高于庄组-雾迷山组碳酸盐岩地层曾发生过强烈的热水溶蚀改造,且目前岩溶热水对储层仍具有溶蚀改造的潜力。高于庄组和雾迷山组白云岩储层裂缝和溶蚀孔洞中可见重晶石、天青石、萤石和黄铁矿等热液矿物^[21],成为地热流体对白云岩储层的改造重要证据。之所说岩溶热水对储层仍具有溶蚀改造的潜力,主要证据有:①周瑞良(1987)、陈墨香(1999)和阎敦实等(2000)认为渤海湾盆地碳酸盐岩地层中广泛存在冷热水的交替和深层热水的上涌现象,并认为这是渤海湾盆地局部(潜山)地热异常一个重要因素^[32-34];②根据地热井的统计数据,高于庄组-雾迷山

组碳酸盐岩岩溶热储的温度普遍介于60 ~ 120 °C^[12],仍处于“溶蚀窗”内;③氢、氧同位素组成特征与Na-K-Mg三角图解表明,渤海湾盆地潜山岩溶热水主要来源雨水,虽然在地下经历了复杂的水-岩作用但目前为未成熟水,因此岩溶热水仍对岩溶储层仍具有溶蚀改造的潜力(图8)。综合以上分析,认为研究区深层地热水对高于庄-雾迷山组碳酸盐岩储层曾经进行了强烈改造作用,且现今仍具有强烈的溶蚀改造的潜力。

3.3 构造作用

如前文所述,高于庄组-雾迷山组碳酸盐岩储层在地质演化过程中,经历了多期褶皱、断裂和断块运动,岩石内部产生了多期断层和节理系统,为风化壳和内幕型岩溶作用提供了有利构造条件。断层相当于大型构造缝,常伴生大量小型构造缝。根据钻井岩心和地面露头统计,层内缝和穿层缝密度一般为50 ~ 100条/m,具有多期、多组系组合的特点,大多为未充填缝或半充填缝,见溶蚀扩大现象,开启宽度多在0.01 mm以上。同时可以发现,次生裂缝发育与构造应力面(褶皱轴面和断面)分布密切相关,如双洞背斜轴部碳酸盐岩网状裂缝发育于背斜轴部与逆断层交汇处(图4c)。

根据裂缝充填物碳氧同位素分析,认为印支期以来的构造运动为本区的主要造缝阶段,但印支期构造缝多被充填。燕山-喜马拉雅期构造缝则被半充填或未充填(图9),为研究区白云岩储层的有效裂缝,对形成现今有效网状裂缝系统具有决定性的意义。断裂与裂缝作用在一定程度上提高储层孔隙度,更能使有效渗透率成几何数量级增长,形成断裂高渗带,成为酸性流

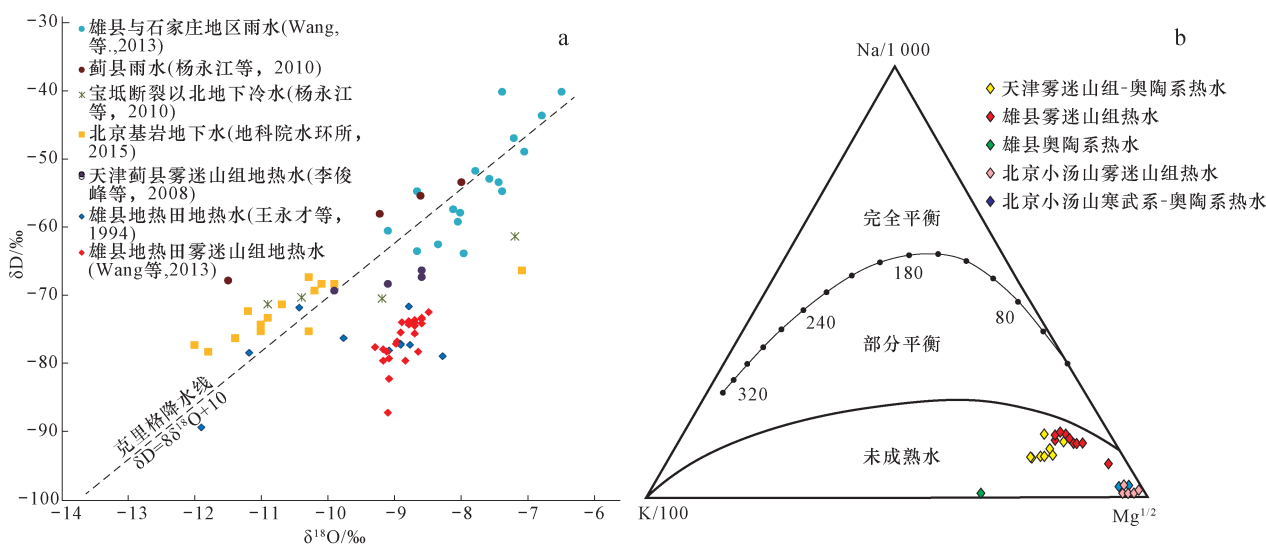


图8 华北平原基岩潜山地下水地球化学特征

Fig. 8 Geochemical characteristics of the underground water in the buried hill bedrock reservoir of North China Plain

a. 氢、氧同位素散点图(数据据文献[35-38]); b. 潜山岩溶热水 K-Na-Mg 平衡图解(底图据文献[39])

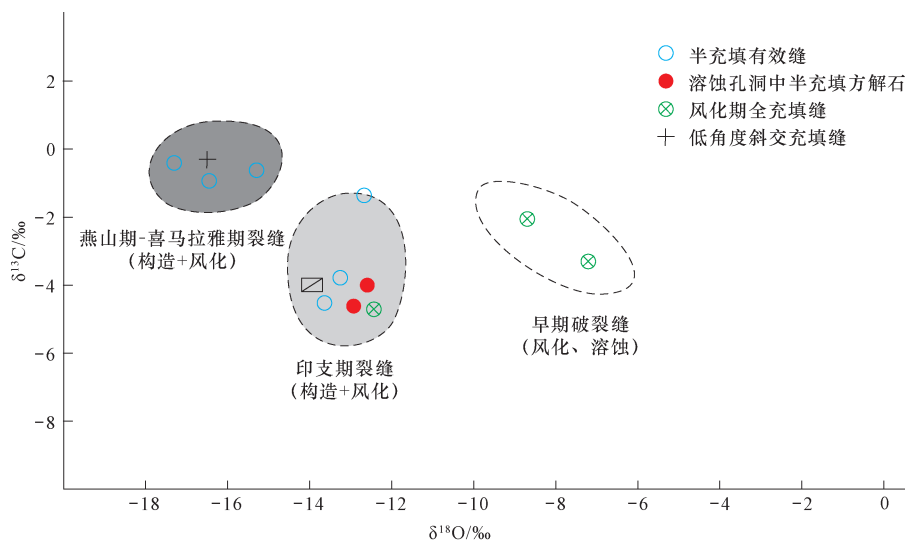


图9 华北北部地区蓟县系高于庄组-雾迷山组溶蚀孔洞与裂缝充填物碳、氧同位素组成

Fig. 9 Carbon and oxygen isotopic compositions of the fillings in the dissolved pores and cavities, as well as fractures in the Gaoyuzhuang-Wumishan Formations in the Jixian System, the north of North China

体和热水运移的重要通道。因此,断裂与裂缝的发育能够有效促进岩溶作用的发生和内幕型岩溶储层的形成。

蚀作用的微生物礁滩为华北地区高于庄组-雾迷山组最有利的储集体。

4 结论

1) 华北地区高于庄组-雾迷山组为一套巨厚的碳酸盐岩,目前已基本白云石化或部分白云石化。总体上,白云岩以微生物岩为主,岩石结构构造复杂,雾迷山组可见大量的叠层石、层纹石、均一石、凝块石和核形石等微生物岩类型,而高于庄组岩石类型相对单一,以层状和微波状叠层石为主。其中,形成于高能环境的锥状叠层石和凝块石白云岩为最有利的储集岩石类型。

2) 白云岩储层储集空间类型多样,可见到不同规模和不同尺度的孔洞缝,它们单独出现或呈一定的组合构成孔-洞和孔-缝或孔-洞-缝等储集系统。根据储集空间组合特征,可将储层划分为孔洞缝复合型、裂缝-孔隙型和孔隙型3种类型。其中,蓟县系雾迷山组白云岩储层物性最好,以孔洞缝复合型为主;高于庄组物性相对较差,以裂缝-孔隙型和孔隙型为主。

3) 综合分析认为,制约研究区高于庄组-雾迷山组白云岩储层形成的因素主要有沉积相,白云石化、溶蚀、重结晶、压实压溶和充填胶结等成岩作用以及构造破裂作用,其中,规模优质白云岩储层的形成主要受控于微生物礁滩、印支期以来的构造隆升与破裂作用及溶蚀作用,为多种有利因素耦合作用的结果。其中,经历了晚期构造破裂、风化淋滤及溶

参 考 文 献

- [1] 杨克绳. 任丘古潜山油田的发现与地质特点[J]. 断块油气田, 2010, 17(5): 525-528.
Yang Kesheng. Discovery and geologic characteristics of Renqiu Oil-field with buried hill[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(5): 525-528.
- [2] 杜金虎, 邹伟宏, 费宝生, 等. 冀中坳陷古潜山复式油气聚集区[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 558-568.
Du Jinfu, Zouhong, Fei Baosheng, et al. Accumulation areas in the buried hills of Jizhong depression [M]. Beijing: Scientific Press, 2002: 558-568.
- [3] 赵贤正, 王权, 金凤鸣, 等. 冀中坳陷隐蔽型潜山油气藏主控因素与勘探实践[J]. 石油学报, 2012, 33(S1): 71-79.
Zhao Xianzheng, Wang Quan, Jin Fengming, et al. Main controlling factors and exploration practice of subtle buried-hill hydrocarbon reservoir in Jizhong depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 71-79.
- [4] 叶涛. 渤海湾盆地潜山油气藏形成条件及主控因素研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
Ye Tao. Studies on formation conditions and main controlling factors of buried hill reservoirs in Bohai Bay Basin [D]. Qingdao China University of Petroleum (Eastern China), 2013.
- [5] 杨桂茹, 崔周旗, 崔俊峰, 等. 冀中坳陷油气储量分布特征及未来储量区带分析[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 923-929.
Yang Jiaru, Cui Zhouqi, Cui Junfeng, et al. Distribution characteristics of gas and oil reserves and analysis of the future reserves in Jizhong depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(6): 923-929.
- [6] 余家仁, 樊哲仁. 任丘古潜山油田碳酸盐岩储层研究[J]. 石油学

- 报,1981,2(1):57-68.
- Yu Jiaren, Fan Zeren. A study on the carbonate reservoirs rocks of Renqiu buried-hill oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 1981, 2(1): 57-68.
- [7] 吴兴宁, 李国军, 田继强, 等. 冀中坳陷碳酸盐岩潜山内幕储层特征及其形成主控因素[J]. 特种油气藏, 2011, 18(2): 22-25.
- Wu Xingning, Li Guojun, Tian Jiqiang, et al. Characteristics of inner buried hill carbonate reservoirs and their main controlling factors in the Jizhong Depression[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2011, 18(2): 22-25.
- [8] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312-321.
- [9] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449-459.
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2017, 38(4): 449-459.
- [10] 周瑞良, 刘琦胜, 张晶, 等. 华北断陷盆地牛驼镇基岩高凸起型热田地质特征及其开发前景[J]. 中国地质科学院 562 综合大队集刊, 1989(第7-8号): 21-36.
- Zhou Ruiliang, Liu Qisheng, Zhang Jing, et al. The geological features and exploitive prospects of the geothermal field of salient type of bed rock of Niutuozen in the fault basin of North China[J]. Bulletin of the 562 comprehensive geological brigade Chinese Academy of Geological Sciences, 1989(No. 7-8): 21-36.
- [11] 陈墨香, 黄歌山, 张文仁, 等. 冀中牛驼镇凸起地温场的特点及地下热水的开发利用[J]. 地质科学, 1982(3): 239-252.
- Chen Moxiang, Huang Geshan, Zhang Wenren, et al. The temperature distribution pattern and the utilization of geothermal water at Niutuozen basement protrusion of central Hebei province[J]. Scientia Geologica Sinica, 1982(3): 239-252.
- [12] 李朋威, 何治亮, 冯建赞, 等. 中国东部主要沉积盆地型热储产出特征与地热开发利用建议[J]. 科技导报, 2017(14): 77-81.
- Li Pengwei, He Zhiling, Feng Jianyun, et al. Output characteristics of the main sedimentary geothermal reservoirs in the eastern part of China and suggestions on geothermal exploitation and utilization[J]. Science & Technology Review, 2017(14): 77-81.
- [13] 余家仁, 雷怀玉, 刘趁花. 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[J]. 海相油气地质, 1998, 3(1): 39-48.
- Yu Jiaren, Lei Huaiyu, Liu Zhenhua. A discussion of factors influencing marine carbonate rock reservoir development: A case study of Wumishan Formation of Renqiu oilfield[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1998, 3(1): 39-48.
- [14] 余家仁, 陶洪兴. 任丘油田碳酸盐岩储层演化[J]. 石油勘探与开发, 1984(6): 1-8.
- Yu Jiaren, Tao Hongxing. Evolution of the carbonate reservoir rocks in Renqiu oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 1984(6): 1-8.
- [15] 赵国春, 孙敏, Wilde S A. 早-中元古代 Columbia 超级大陆研究进展[J]. 科学通报, 2002, 18: 1361-1365.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A. Development of the research on the Early-Middle Proterozoic Columbia Supercontinent[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 18: 1361-1365.
- [16] 孟祥化, 葛铭. 中朝板块旋回层序、事件和形成演化[J]. 地学前缘, 2002, 77(3): 145.
- Meng Xianghua, Ge Ming. Research on cyclic sequence, events and formation evolution of the Sino-Korea Plate[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 77(3): 125-140.
- [17] 苏文博. 华北及扬子克拉通中元古代年代地层格架厘定及相关问题探讨[J]. 地学前缘, 2016, 23(6): 156-185.
- Su Wenbo. Revision of the Mesoproterozoic chronostratigraphic both of North China and Yangtze cratons and the relevant issues[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(6): 156-185.
- [18] 程裕淇. 中国地层典总论[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- Cheng Yuqi. General Introduction to the Chinese Strata[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [19] 金廷福. 天津蓟县雾迷山组微生物碳酸盐岩沉积与储层特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- Jin Tingfu. Sedimentary and reservoir characteristics of the microbial carbonate rocks in Wumishan Formation, Jixian county, Tianjin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [20] 乔秀夫. 中朝板块元古宙板内地震带与盆地格局[J]. 地学前缘, 2002, 9(3): 141-149.
- Qiao Xiufu. Intraplate seismic belt and basin framework of Sino-Korean Plate in Proterozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(3): 141-149.
- [21] 丁连湖. 华北油田勘探开发研究院志 1973-2000[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 88-96.
- Ding Lianhu. Journal of Exploration and Development Research Institute of North China Oil field (1973-2000)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 88-96.
- [22] Hofmann H J, Jinbiao C. Carbonaceous megafossils from the Precambrian (1800? Ma) near Jixian, northern China[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1981, 18(3): 443-447.
- [23] 赵澄林. 华北中新元古界油气地质与沉积学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- Zhao Chenglin. The Meso-Upper Proterozoic oil and gas geologic and sedimentology in North China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [24] 赵澄林, 王中文, 迟元苓. 燕山西段震旦亚界地层岩石学特征及其沉积相[J]. 华东石油学院学报, 1979(1): 1-32.
- Zhao Chenglin, Wang Zhongwen, Ci Yuanling. Lithological characteristics and sedimentary facies of the Sinian subboundary in the Western Yanshan[J]. Journal of China University of Petroleum, 1979(1): 1-32.
- [25] 赵澄林, 许元恺, 白光勇, 等. 太行山中北段高于庄组一雾迷山组的沉积特征及其相分析[J]. 华东石油学院学报, 1977(3): 118-189.
- Zhao Chenglin, Xu Yuankai, Bai Guangyong, et al. Sedimentary characteristics and facies analysis of the Gaogaozhuang Formation-Wumishan Formation in the Northern Taihang Mountain[J]. Journal of China University of Petroleum, 1979(1): 1-32.