文章编号:1673-5005(2022)02-0012-13　　doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2022.02.002

大港探区扣村潜山带二叠系优质砂岩储层成因机制

孙沛沛[1], 操应长[1,2], 周立宏[3], 远光辉[1,2], 靳子濠[1], 吴智平[1],
张飞鹏[3], 付立新[3], 李宏军[3], 楼　达[3], 李玉海[4], 王文庆[4]

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,山东青岛 266071; 3. 中国石油大港油田公司,天津 300280;
4. 中石油东方地球物理公司研究院大港分院,天津 300280)

摘要:综合利用岩心观察、薄片鉴定、阴极发光分析、扫描电镜观察、碳氧同位素及氢氧同位素组成分析、压汞及岩石物性测试等技术方法,结合埋藏演化史和油气充注史,对大港探区扣村潜山带二叠系砂岩储层进行研究。研究表明:扣村潜山带二叠系优质砂岩储层以高成分成熟度、较高的结构成熟度为特征,优质储层储集空间以次生粒间孔及粒内孔为主;在构造运动的控制下,成岩作用演化序列依次为压实作用—早期菱铁矿胶结作用—长石溶蚀/自生高岭石胶结—长石溶蚀、自生高岭石沉淀/少量自生石英—晚期铁方解石胶结;优质储层的发育受多种因素控制,高成熟度的中粗砂岩是优质储层形成的物质基础,两次地层抬升剥蚀导致的长期大气淡水淋滤作用形成大量次生孔隙是优质储层发育的关键,晚期地层浅埋藏弱压实有利于次生孔隙的保存;重力作用下的地层水下降流促使砂岩中的储集物性分异,潜山顶部溶蚀产物随水流动,在此过程中逐渐沉淀,形成了自潜山顶部向山腰依次发育的溶解带、过渡带与沉淀带。

关键词:成因机制; 成岩作用; 砂岩储层; 二叠系; 大港探区
中图分类号:TE 122.2　　**文献标志码**:A
引用格式:孙沛沛,操应长,周立宏,等. 大港探区扣村潜山带二叠系优质砂岩储层成因机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(2):12-24.
SUN Peipei, CAO Yingchang, ZHOU Lihong, et al. Genetic mechanisms of high quality sandstones reservoirs in Permian of Koucun buried hill, Dagang exploration area[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2022,46(2):12-24.

Genetic mechanisms of high quality sandstones reservoirs in Permian of Koucun buried hill, Dagang exploration area

SUN Peipei[1], CAO Yingchang[1,2], ZHOU Lihong[3], YUAN Guanghui[1,2], JIN Zihao[1], WU Zhiping[1], ZHANG Feipeng[3], FU Lixin[3], LI Hongjun[3], LOU Da[3], LI Yuhai[4], WANG Wenqing[4]

(1. *School of Geosciences in China University of Petroleum(East China)*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *Laboratory for Marine Mineral Resources*, *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology*, *Qingdao* 266071, *China*;
3. *Exploration and Development Research Institute*, *Dagang Oilfield Company*, *Tianjin* 300280, *China*;
4. *Dagang Branch of GRI*, *BGP Incorporated Company*, *CNPC*, *Tianjin* 300280, *China*)

Abstract: Combined with the history of burial evolution, organic matter thermal evolution and hydrocarbon charge, genetic mechanisms of the sandstones reservoirs in the Permian of Koucun buried hill were investigated, based on a series of analyses

收稿日期:2021-10-25
基金项目:国家自然科学基金项目(41872140,41821002); 泰山学者青年专家项目(tsqn201909061);青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(2021QNLM020001)
第一作者:孙沛沛(1989-),男,博士研究生,研究方向为油气储层地质学。E-mail:sunpei1022@163.com。
通信作者:操应长(1969-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为沉积学、层序地层学及油气储层地质学。E-mail:cyc8391680@163.com。

including core observation, thin section examination, cathode luminescence analysis, scanning electron microscopy, fluid inclusions, carbon and oxygen isotope, hydrogen and oxygen isotopes, mercury penetration, porosity-permeability test. The results show that the reservoirs in the Permian of Koucun buried hills are characterized by a high compositional maturity and a relatively high textural maturity, and the porosity types are mainly secondary pores. Under the control of tectonic movements, the diagenetic sequence includes successive compaction, early siderite cementation, early feldspar dissolution accompanied by authigenic kaolinite precipitation, late feldspar dissolution accompanied by quartz overgrowth and authigenic kaolinite precipitation, and late carbonate cementation. High quality sandstones reservoirs are controlled by multiple factors. Medium-coarse sandstone of high maturity made up the favorable material foundation of reservoirs, multi-stage dissolution is the key element to form reservoirs, and weak compaction after dissolution effectively preserved the secondary pores. The formation water flew under gravity, and differentiated the physical property of the reservoir. As a result, the areas of dissolution, transition and precipitation are located from the top of buried hill to the hillside successively.

Keywords: genetic mechanisms; diagenesis; sandstones reservoirs; Permian; Dagang exploration area

近年来,随着勘探程度的不断提高,二叠系储层逐渐成为油气勘探的热点。鄂尔多斯盆地上古生界探明天然气资源量 12.61×10^{12} m^3,多集中于二叠系地层[1-4];同处华北板块的渤海湾盆地二叠系亦发现了大规模油气聚集[5-7],如济阳坳陷花古斜 101 井日产油 51 t,日产气 4 506 m^3,大港探区扣 11 井日产油 115 t,日产气 4 517 m^3,营古 2 井日产油 18.8 t,日产气 178 897 m^3。不同于构造简单、以整体升降为主的鄂尔多斯盆地,大港探区在中、新生代经历了复杂的基底断裂改造过程,形成了大量的潜山构造,针对大港探区古潜山的认识及勘探程度都不高,潜山领域油气资源探明程度也低[8-10]。潜山构造历经多次构造变革和储层差异改造,使油气藏分布规律复杂多变,因此明确潜山背景下的优质储层形成机制,对渤海湾盆地二叠系油气勘探有重要的理论指导意义。大港探区扣村潜山带二叠系砂体发育,是油气勘探的重要目标。研究区钻井油气显示活跃,其中扣 11、扣 38-16 井均获高产工业油流。笔者以大港探区扣村潜山带二叠系砂岩储层为例,综合运用钻井取芯、岩石薄片、扫描电镜、压汞测试、物性测试等资料,结合区域地质背景,研究其储层基本特征,结合储层埋藏史、热史及试油试采成果,研究储层成岩演化过程及优质储层成因机制。

1　地质概况

大港探区主体位于渤海湾盆地中心地带,包括黄骅坳陷、沧县隆起、埕宁隆起等 3 个大地构造单元。二叠纪时期发生大规模海退,大港探区二叠纪发育海陆过渡相及陆相碎屑岩地层[11],自下而上依次为山西组(P_1s)、下石盒子组(P_1x)、上石盒子组(P_2s)、石千峰组(P_2sh)。大港探区在中、新生代经历了复杂的基底断裂改造过程,形成了大量的潜山构造[10]。扣村潜山带位于大港探区歧口凹陷南缘,扣村地区二叠系主要发育在扣 11 断块,受白垩纪末期燕山运动及新生代喜山运动的影响,扣村地区二叠系仅残余上、下石盒子组河流相沉积和山西组三角洲沉积地层,厚度约 300 m,其中上石盒子组辫状河砂体纵向厚度大,横向分布稳定,钻井油气显示活跃,为主要勘探目的层(图 1)。

依据扣村地区二叠系地层构造演化将其划分为以下几个阶段:海西期至早印支阶段(295~227 Ma)扣村地区二叠系地层稳定沉降;印支运动中期至燕山运动初期(227~161.2 Ma),歧口凹陷主要以大规模挤压推覆以及大型褶皱变形为主,扣村地区二叠系地层抬升,顶部差异风化剥蚀;燕山运动中期(161.2~96 Ma)地层稳定沉降;燕山运动末期至喜山运动初期(96~32.8 Ma)的基底差异断块活动导致二叠系地层再次抬升,局部地区上覆中生界地层被完全剥蚀;新近纪至今(32.8~0 Ma),地层再次稳定沉降(图 2)。

2　储层基本特征

2.1　岩石学特征

根据研究区岩心观察和薄片鉴定结果,大港探区扣村潜山带二叠系储层岩性以中、粗砂岩及含砾砂岩为主,其次为少量细砂岩等。研究区储层岩石类型以石英砂岩、长石质石英砂岩为主,含少量岩屑质石英砂岩、岩屑质长石砂岩等,岩石成分成熟度较高,骨架颗粒中石英平均体积分数为 81.90%,多为单晶石英,长石平均体积分数为 10.35%,以钾长石为主,岩屑以变质岩岩屑为主,平均体积分数为 11.30%,储层杂基含量低,平均体积分数为 7.74%(图 3)。储层中碎屑颗粒以点—线接触为主,分选较好,分选系数主要集中在 1.22~2.50,颗粒磨圆以次棱角状—次圆状为主;胶结方式主要为孔隙式胶结。

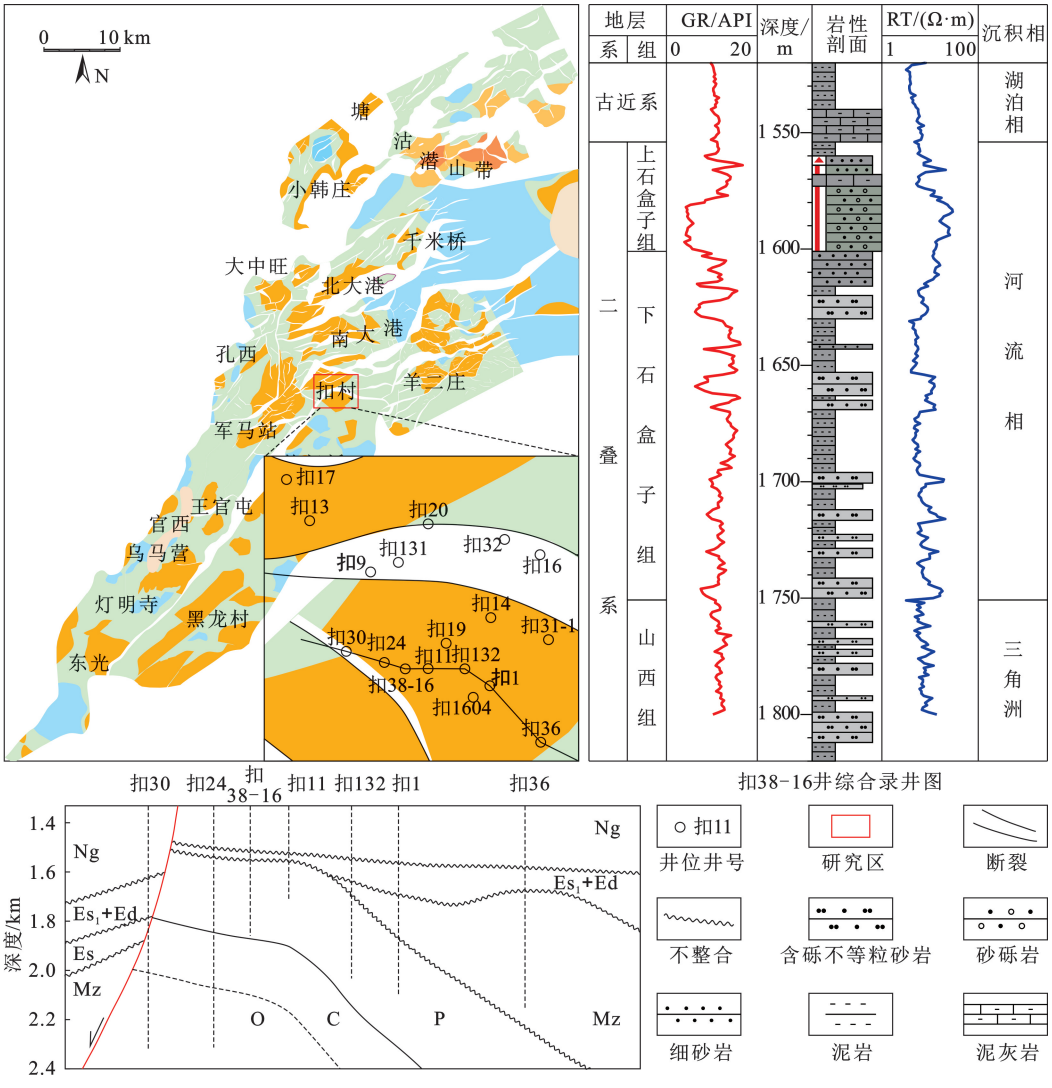


图 1　扣村潜山带构造位置、构造特征及沉积地层特征

Fig. 1　Tectonic location, tectonic characteristics and sedimentary strata of Koucun buried hill

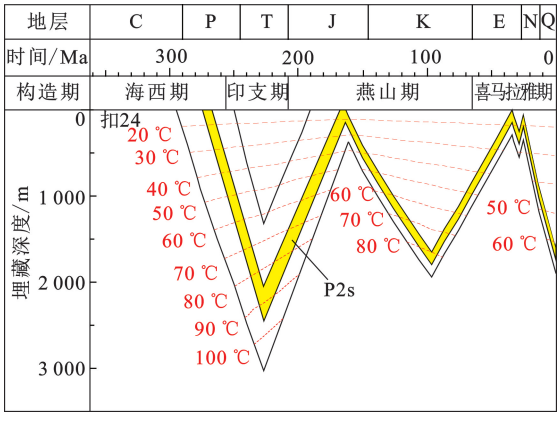


图 2　扣 24 井埋藏史-热史

Fig. 2　Burial and thermal history of well Kou24

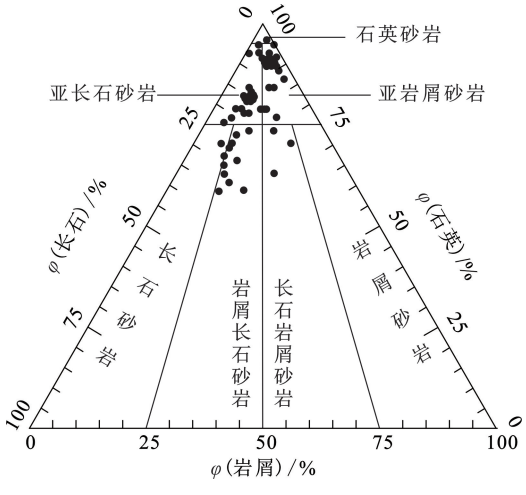


图 3　扣村潜山带二叠系储层岩石类型图解

Fig. 3　Rock type diagram of reservoirs in Permian of Koucun buried hill

2.2　储集空间及物性特征

统计扣村地区二叠系实测物性数据,研究区储层孔隙度为 3%~20.3%,平均孔隙度为 13.07%,其中孔隙度为 15%~25%的储集层比例为 42.27%,孔隙度为 10%~15%的储集层比例为 31.71%;渗透率为(0.05~1 270)×10^{-3} μm^2,平均渗透率为 92.98×10^{-3} μm^2,其中渗透率大于 100×10^{-3} μm^2 的储集层比例为 20.69%,渗透率为(10~100)×10^{-3} μm^2 的储集层比例为 27.59%(图 4)。由此可见,研究区二叠系储层主要为中低孔中低渗储层。

对扣村地区二叠系砂岩储层 50 余块样品的孔隙类型统计显示,大港探区扣村潜山带二叠系储层储集空间以次生孔隙为主,原生孔隙局部发育,另有少量高岭石晶间微孔(图 5(a)~(e))。次生孔隙主要包括铸模孔、超大孔隙及长石粒内溶孔等。其中粒间孔隙占总孔隙的 91.04%,粒内孔隙占总孔隙的 4.54%,微孔隙占 4.42%(图 5(f))。

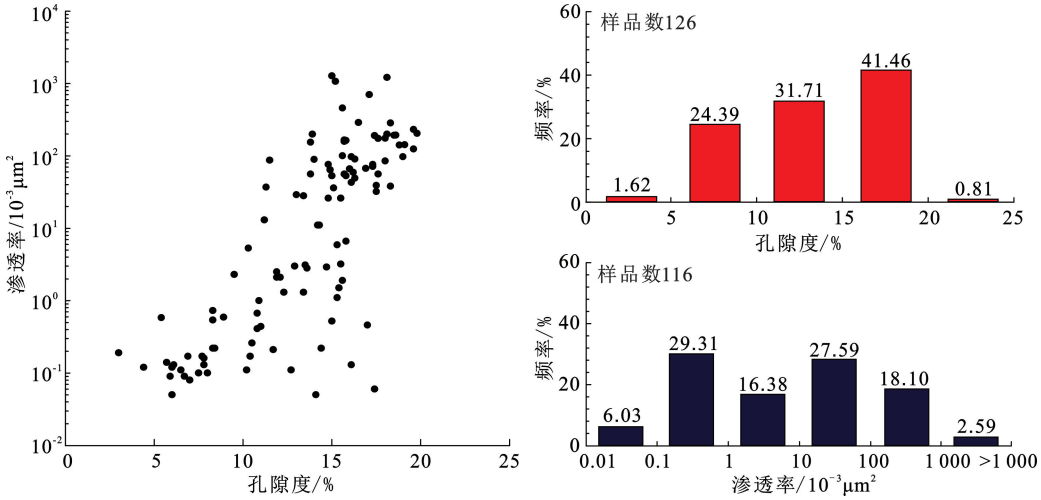
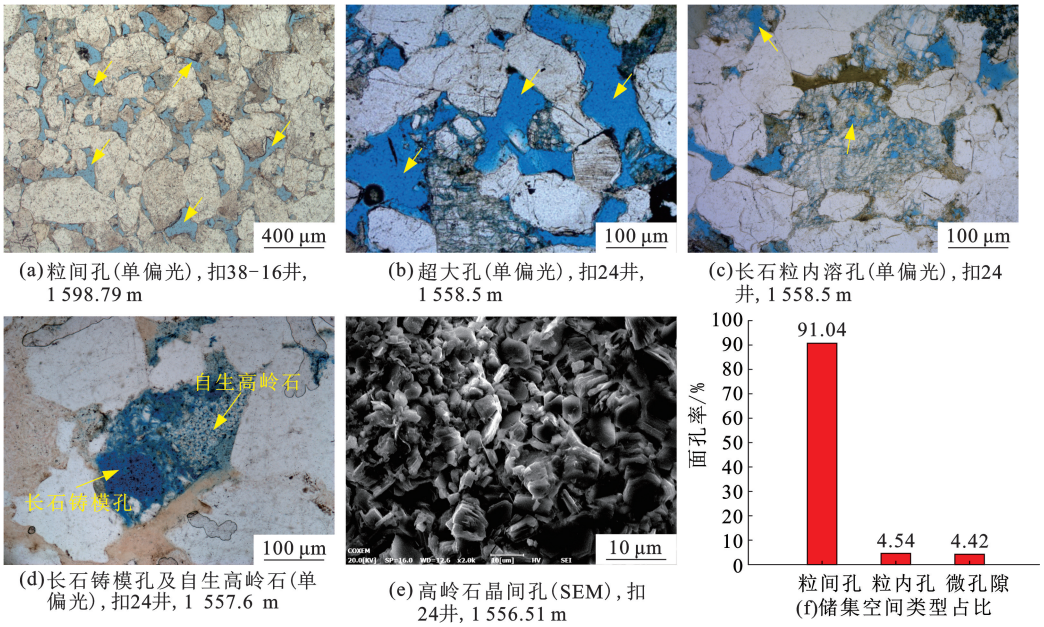


图 4　二叠系储层物性分布特征

Fig. 4　Distribution characteristics of physical properties of reservoirs in Permian



(a)粒间孔(单偏光),扣38-16井,1 598.79 m　(b)超大孔(单偏光),扣24井,1 558.5 m　(c)长石粒内溶孔(单偏光),扣24井,1 558.5 m

(d)长石铸模孔及自生高岭石(单偏光),扣24井,1 557.6 m　(e)高岭石晶间孔(SEM),扣24井,1 556.51 m　(f)储集空间类型占比

图 5　扣村地区二叠系储层储集空间类型

Fig. 5　Reservoir spaces of reservoirs in Permian of Koucun buried hill

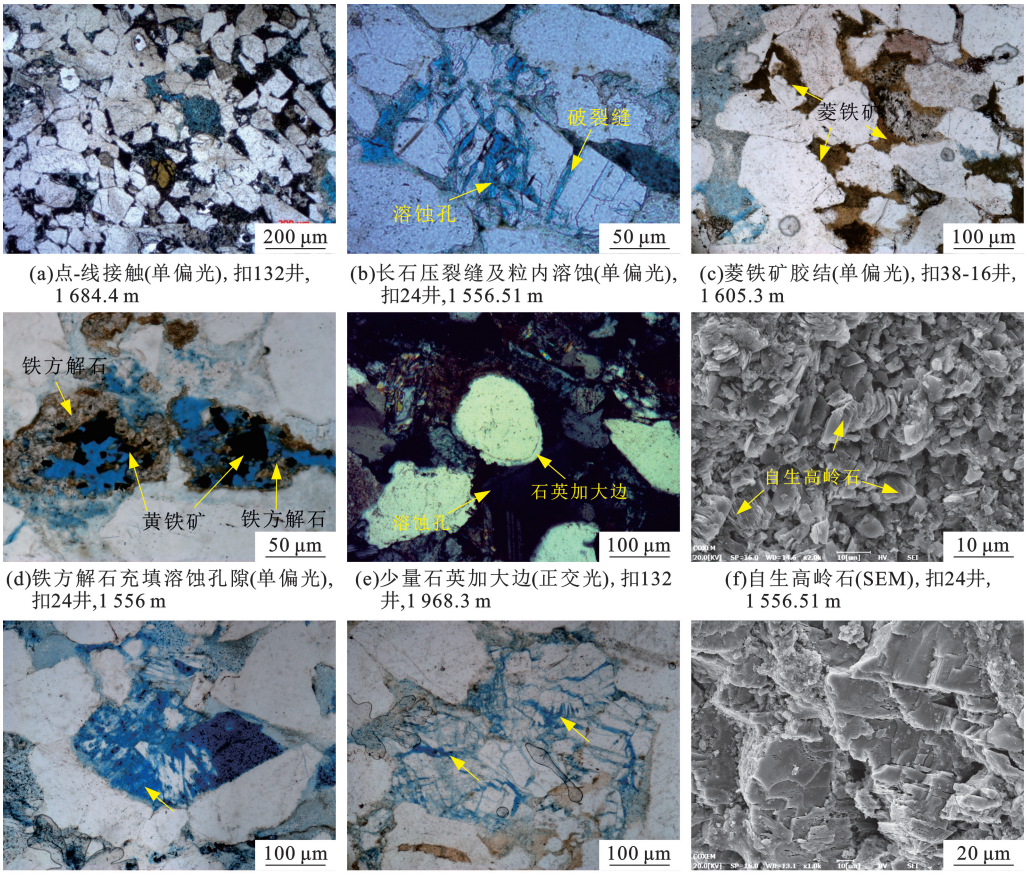
3　储层成岩作用特征

3.1　成岩作用类型与特征

通过对扣村地区二叠系碎屑岩储层镜质体反射率 R_o(0.63%~0.78%)分布、伊蒙层间比、自生矿物发育等方面的研究,依据石油行业标准(SY/T5477-2003)碎屑岩成岩阶段划分规范[12],认为扣村地区二叠系碎屑岩储层目前处于中成岩 A 期。

扣村地区二叠系碎屑岩储层成岩作用具有弱—中等压实、多期溶解、弱胶结的整体特征。

压实作用:扣村地区二叠系储层中石英、长石等刚性颗粒含量高,岩浆岩、变质岩及沉积岩等塑性岩屑含量相对较低,储集层抗压能力强,压实作用弱—中等。压实常见的主要特征有碎屑颗粒间以点—线接触为主(图 6(a)),长石等脆性颗粒的压实破裂(图 6(b))等。据 Beard 和 Weyl[13] 提出的碎屑岩初始孔隙度计算方法,恢复砂体沉积时的初始孔隙度,结合配套的岩石薄片、储层物性资料,定量统计储层总减孔量、压实减孔量(率)胶结减孔量(率),分析各类成岩作用对储层物性的影响。研究区压实作用损失孔隙度 12%~24%,损失的原生孔隙可占总孔隙的 20%~80%。



(a)点-线接触(单偏光),扣132井,1 684.4 m　(b)长石压裂缝及粒内溶蚀(单偏光),扣24井,1 556.51 m　(c)菱铁矿胶结(单偏光),扣38-16井,1 605.3 m

(d)铁方解石充填溶蚀孔隙(单偏光),扣24井,1 556 m　(e)少量石英加大边(正交光),扣132井,1 968.3 m　(f)自生高岭石(SEM),扣24井,1 556.51 m

(g)长石溶蚀(单偏光),扣24井,1 556.9 m　(h)长石溶蚀(单偏光),扣24井,1 557.6 m　(i)长石溶蚀(SEM),扣24井,1 556.51 m

图 6　二叠系储层主要成岩作用特征

Fig. 6　Diagenetic characteristics of reservoir in Permian

研究区储集层胶结作用普遍发育,强度较弱,类型多样,主要为碳酸盐胶结、高岭石胶结及少量硅质胶结。碳酸盐胶结物主要有菱铁矿(图 6(c))和铁方解石(图 6(d))两种。菱铁矿局部富集,体积分数可达 2%,以团块状充填粒间,由于压实作用常表现为假杂基,为早期成岩矿物。硅质胶结物主要以石英加大边(图 6(e))的方式存在,通过统计可知研究区自生石英平均体积分数不足 1%。研究区黏土矿物以高岭石为主,其次为少量伊利石和伊蒙混层(表 1)。通过 SEM 分析可知,研究区高岭石主要为自生成因,集合体常呈书页状或蠕虫状,大多以充填粒间孔的形式产出(图 6(f)),显著降低储集层物性。研究区储集层胶结减孔量在 1.66%~21.46%,平均为 7.41%,相应的胶结减孔率在 5.24%~69.9%,平均达到 24.23%。

研究区储集层溶蚀作用普遍发育,极大地提高了储层物性。通过铸体薄片和扫描电镜观察发现,长石溶蚀现象最为发育,沿颗粒边缘、解理缝或破裂缝溶蚀,形成不规则边缘、粒内溶孔或铸模孔等(图 5(d),图 6(g)~(i)),局部可见超大溶蚀孔隙(图 5(b)),另有部分岩屑和胶结物溶蚀。研究区储层多期长石溶蚀提供了大量储集空间,包括早期溶蚀形成的大量粒间及粒内溶孔,晚期溶蚀形成的铸模孔等。二叠系储集层整体溶蚀增孔量在 1.7%~13.5%,平均为 8.24%。

表 1　扣村地区二叠系黏土矿物 XRD 数据

Table 1　XRD data of clay minerals in Permian sandstones of Koucun

井号	深度/m	岩性	φ(伊利石)/%	φ(伊/蒙间层)/%	φ(高岭石)/%	伊蒙层间比
扣 38-16 井	1 563.05	中砂岩	12.02	2.20	85.78	<10
扣 38-16 井	1 575.00	细砂岩	5.14	3.42	91.44	<10
扣 38-16 井	1 575.44	细砂岩	9.39	5.20	85.41	<10
扣 38-16 井	1 579.21	中粗砂岩	4.19	1.54	94.27	<10
扣 38-16 井	1 598.00	中粗砂岩	6.99	3.59	89.43	
扣 38-16 井	1 601.84	中粗砂岩	16.36	4.85	78.79	<10
扣 38-16 井	1 607.72	中粗砂岩	15.11	5.21	79.69	15
扣 38-16 井	1 661.27	中粗砂岩	9.68	16.26	74.06	15

3.2　成岩演化序列

微观领域的成岩作用受宏观领域的构造运动影响,构造背景不同,相应的成岩作用机制也不一样,由此影响储层的成岩序列[14]。不同于持续埋藏地层,扣村地区二叠系由于构造运动使地层抬升或下降,使其埋藏过程出现间断,导致各成岩事件发生的顺序及演化持续性受到干扰和中断,因此各成岩现象与深度之间规律性并不明显。

通过铸体薄片及扫描电镜等资料,依据岩石结构、自生矿物分布、组合及交切关系等特征,分析了研究区二叠系储层的成岩演化序列。研究区碳酸盐胶结物主要包括菱铁矿、铁方解石两种,菱铁矿通常分布在颗粒之间,部分菱铁矿使相邻颗粒不接触,说明其形成于储层强烈压实之前,另有菱铁矿环绕长石溶孔发育,说明其形成早于长石溶蚀;常见铁方解石充填长石溶孔,说明其形成晚于长石溶蚀;长石溶蚀过程中主要形成石英加大与自生高岭石等副产物。综上,扣村地区二叠系储层从古到今成岩作用演化序列依次为:压实作用—早期菱铁矿胶结作用—长石溶蚀/自生高岭石胶结—长石溶蚀、自生高岭石沉淀/少量自生石英—晚期铁方解石胶结。

结合研究区构造演化史,恢复工区储层成岩作用演化过程,认为扣村地区二叠系储层的形成主要经历了如下 5 个演化阶段(图 7):①初次埋藏阶段,二叠系沉积后,逐渐埋藏,至三叠纪中期,其最大埋深达 3 000 m,此阶段压实作用强烈,粒间体积急剧缩小,孔隙水排出,孔隙度降低,形成少量菱铁矿胶结物,长石矿物弱溶蚀,伴随少量自生高岭石及硅质

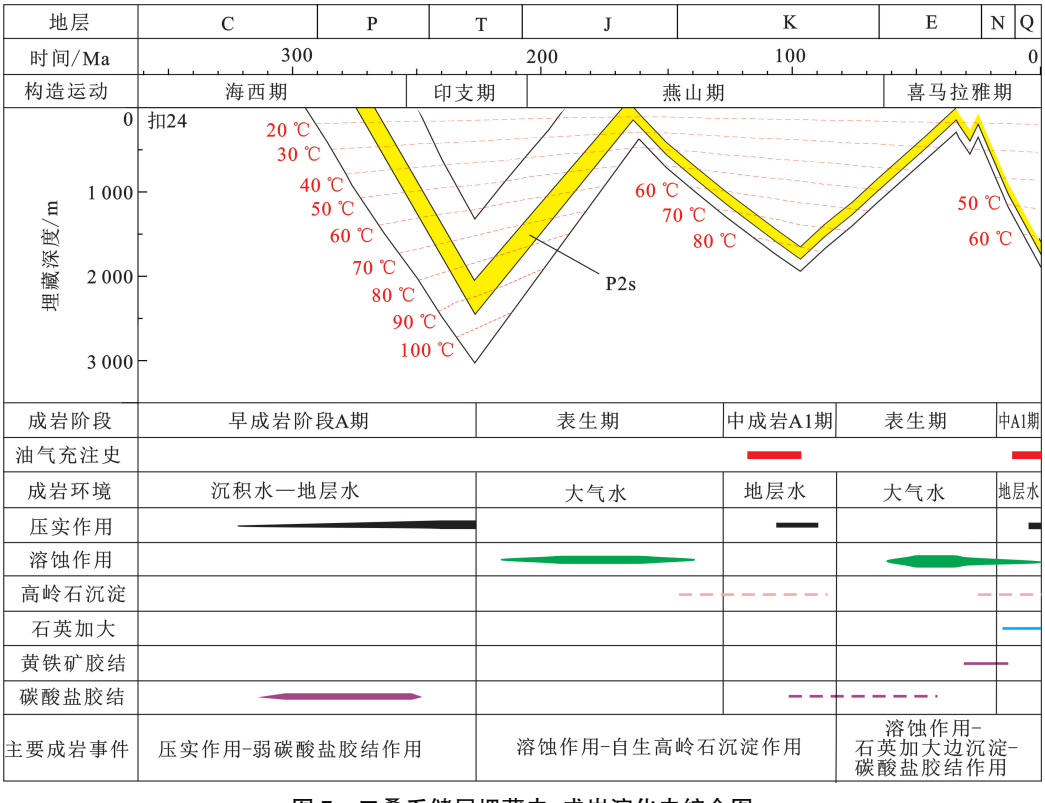


图 7　二叠系储层埋藏史、成岩演化史综合图

Fig. 7　Burial history and diagenesis evolution history of reservoir in Permian

胶结,此阶段主要为早成岩阶段;②第一次抬升阶段,三叠纪中期,扣村地层抬升,二叠系顶部出露地表,地层遭受大气淡水淋滤,导致长石等矿物大量溶解,此阶段主要为表生成岩阶段;③二次埋藏阶段,至侏罗纪,扣村地层再次沉降,此阶段二叠系最大埋深浅于初期埋藏,成岩作用较弱,储层达到中成岩 A1 期;④第二次抬升阶段,白垩纪时期,地层再次抬升,二叠系部分出露地表,遭受长期大气水溶解作用,伴随有少量高岭石及硅质胶结物,此阶段主要为表生成岩阶段;⑤三次埋藏阶段,新生代末期,研究区地层持续沉降,此时地层水介质呈弱碱性,少量铁方解石充填早期形成的长石溶孔。

4　优质储层成因及演化模式

4.1　优质储层主控因素

优质储层的形成主要受沉积作用、成岩作用及构造运动等因素的控制[15-18]。扣村地区二叠系优质储层具有沉积作用为物质基础,溶蚀作用增孔,后期弱压实的特点。

4.1.1　沉积作用

沉积作用控制储层的原始物性,同时影响储层埋藏过程中的成岩作用和物性演化过程[19]。原始沉积条件是形成优质储层的前提和基础[20],其对储层物性的影响本质上主要为碎屑岩成分成熟度、结构成熟度等因素的影响。扣村地区二叠系砂岩成分成熟度高,平均粒径主要介于 0.15~1.0 mm,随着粒径变粗,细砂岩、中砂岩、(含砾)粗砂岩,储层物性逐渐变好(图 8)。造成这一现象的原因是,扣村地区二叠系主要发育河流相砂体,随着砂岩粒径的减小,储层中的原始杂基含量逐渐升高,后期抗压实能力弱,埋藏过程中孔隙损失较快;粗粒径砂体多发育在水动力条件较强的河道环境中,原始杂基含量低且分选较好,具有较高的原始孔隙度及较强的抗压实能力。

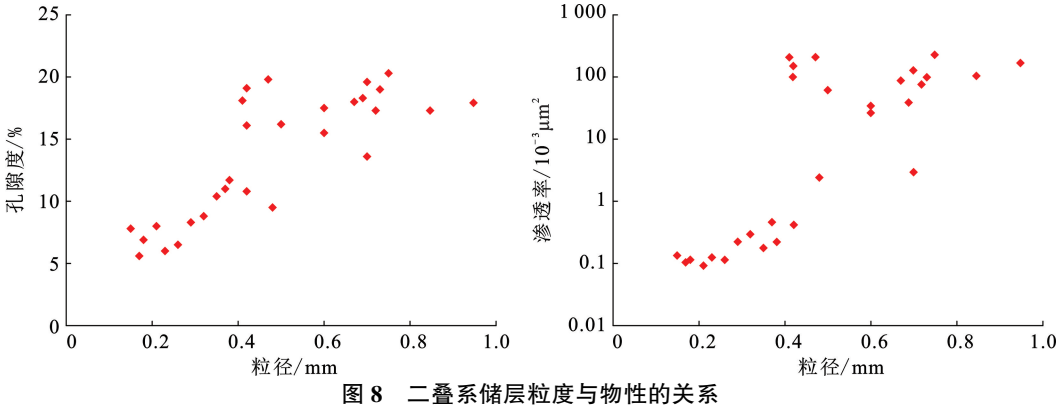


图 8　二叠系储层粒度与物性的关系

Fig. 8　Cross plot of porosity and permeability versus article size of reservoir in Permian

4.1.2　次生溶解作用

结合地震资料(图 9)及埋藏史(图 2)可知,扣村地区二叠系在地质历史时期经历过两次暴露剥蚀,分别发生在三叠纪末期(190~162 Ma)和白垩纪

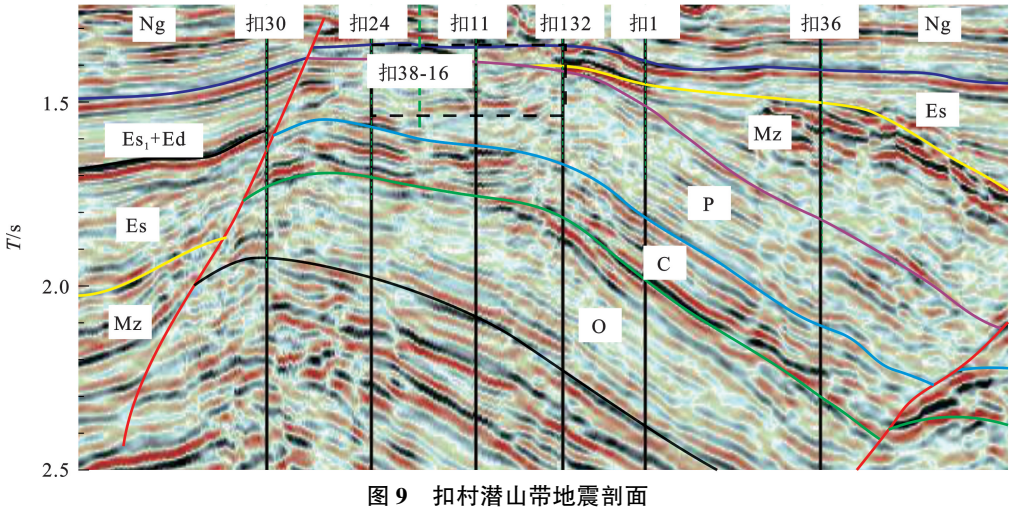


图 9　扣村潜山带地震剖面

Fig. 9　Seismic profile showing structural features of Koucun buried hill

末期(约 34 Ma),致使二叠系出露地表接受大气淡水的溶解作用(图 7)。

从单井特征来看,在扣 38-16 井上可以观察到典型的不整合结构,包括不整合面之下的风化黏土带与下伏淋滤溶解带、淋滤过渡带,钻井岩心上表现出相同的结构特征(图 10)。风化黏土层位于风化壳最上部,是在物理风化的基础上,生物化学风化作用改造下形成的细粒残积物,缺乏沉积构造,是识别不整合的重要标志[21]。研究区二叠系顶部发育厚层灰白色的铝土岩,岩石中可见红褐色铁质充填裂缝(图 10),Al 和 Fe 是岩石风化淋滤后最难淋失的两种元素[22],这表明研究区二叠系储层顶部风化程度极高,与长期的构造抬升剥蚀相吻合。

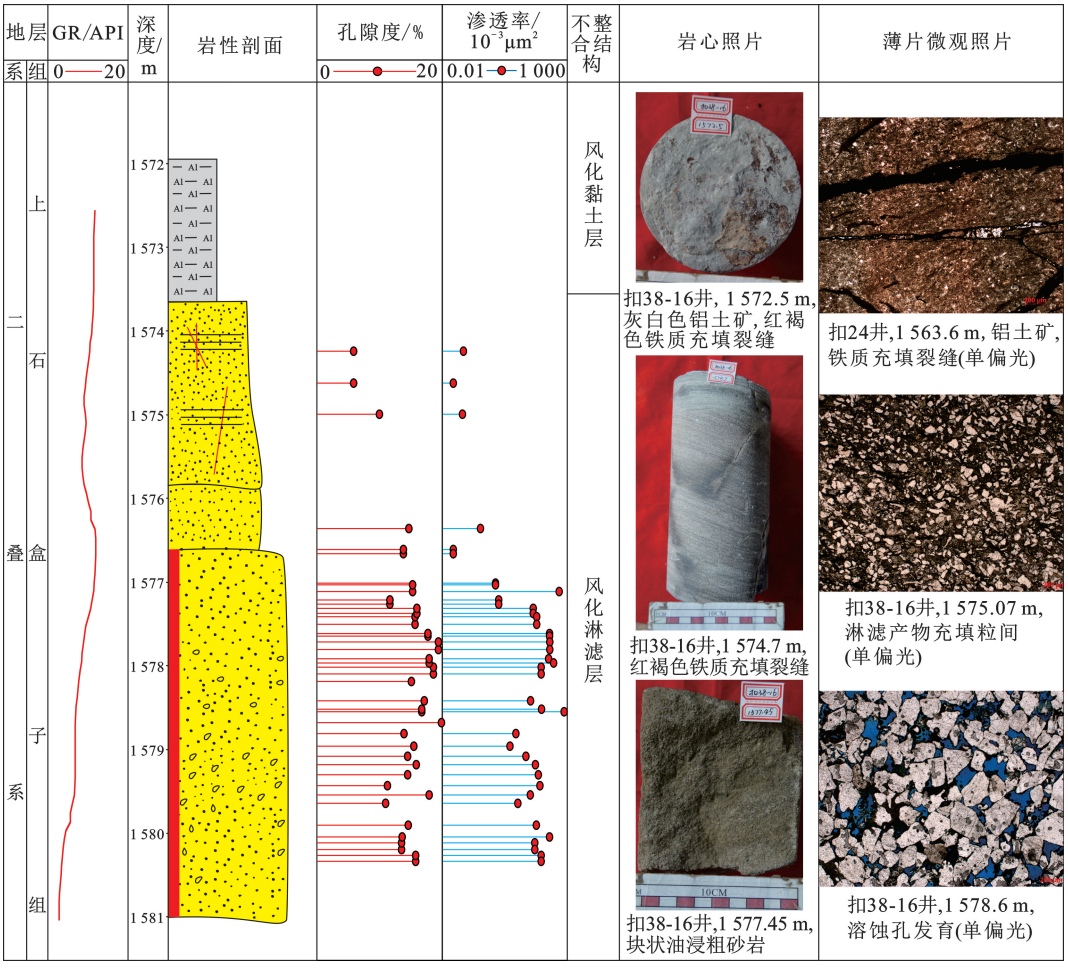


图 10　扣 38-16 井不整合结构特征

Fig. 10　Spatial structures of unconformity in well Kou38-16

统计研究区二叠系砂岩储层物性,自风化淋滤带以下,随着与不整合面之间距离的增加,孔隙度逐渐降低,渗透率的垂向变化具有相同的趋势(图 11),这是由于不整合附近储层中的长石等矿物溶蚀形成了大量次生孔隙[23],改善了储层物性,远离不整合面的储层遭受大气水淋滤较少,溶蚀作用弱。研究区二叠系地层水矿化度整体较低,不整合面附近矿化度为 11.6%~22.6%,并随着与不整合面距离的增加而增大(图 11),说明不整合面附近地层水受大气淡水的稀释作用显著。

砂岩储层中长石溶蚀是增孔效应的主要因素,溶蚀伴随有高岭石及石英胶结物等副产物[24-25],次生孔隙与自生胶结物的定量相关关系则与地化环境有关。通过铸体薄片统计其含量,扣村地区二叠系储层中长石溶蚀孔隙体积分数平均可达 4.38%,而自生高岭石体积分数为 1.71%,硅质胶结物体积分数为 0.34%,长石溶蚀量明显大于自生矿物产量(图 12),说明长石溶蚀产物多被运移出潜山顶部淋滤溶解带。

长石溶蚀作用形成的次生孔隙并不能保存其成因相关地化证据,因此通过分析溶蚀形成的副产物分析其成因。自生高岭石是扣村地区二叠系重要的

自生矿物,且纯度较高(表 1)。自生高岭石氢氧同位素数据可用来分析推测其形成时的古流体来源[26],对研究区自生高岭石进行分离提纯,并进行 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素分析。结果表明,δD 数据介于 −116.9‰ ~ −101.3‰, $\delta^{18}O$ 数据介于 −18.2‰ ~ −16.5‰。研究区同位素数据全部落在大气水淋滤成因高岭石区内(图 13),这与前述大气水淋滤长石矿物的结论相吻合。

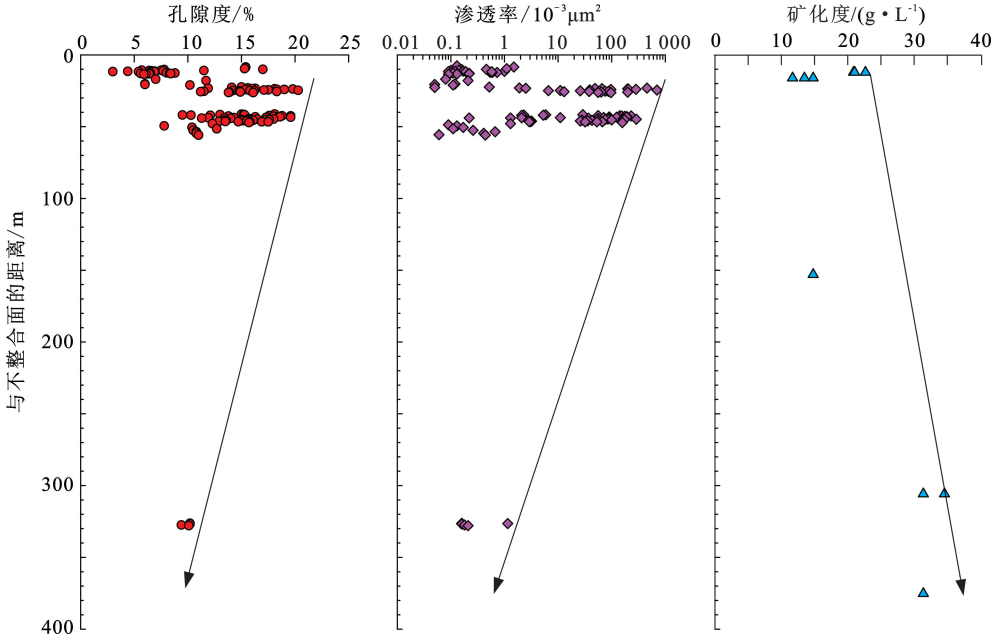


图 11　扣村地区孔渗及地层水矿化度纵向分布与不整合距离的关系

Fig. 11　Vertical distribution characteristics of porosity, permeability and salinity of pore water versus distance to uncomformity of Koucun

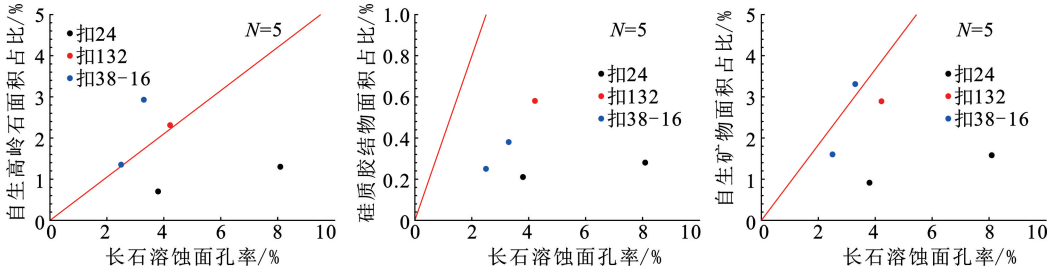


图 12　溶蚀孔隙与自生矿物定量关系

Fig. 12　Relationship between secondary pores and authigenic minerals

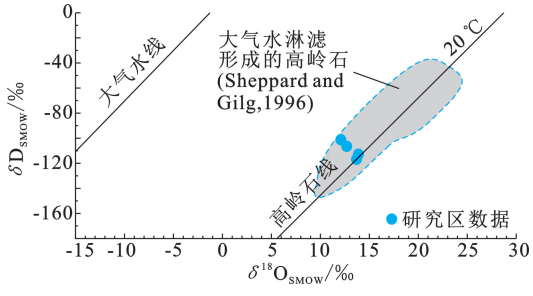


图 13　自生高岭石氢氧同位素组成(图版据文献[27])

Fig. 13　Plot of δD and $\delta^{18}O$ values of authigenic kaolin

(According to citation [27])

取扣村潜山顶部连井剖面进行精细解剖,可知二叠系砂体横向分布稳定,且连通性好。其中扣 24、扣 38−16 井位于潜山顶部,其储集空间明显优于翼部扣 132 井相同层位储层(图 14),这是由于潜山顶部储层遭受淋滤作用,长石的溶蚀产物如硅质和高岭石等沿倾斜地层下渗,砂体下倾方向储层中胶结物明显高于潜山顶部。在地层抬升剥蚀阶段,同层砂体自山顶往下依次形成溶蚀区、过渡区及沉淀区。

4.1.3　*后期弱压实*

通过埋藏史图可以看出,二叠系储层初次埋藏最大埋深(227 Ma)可达 3 000 m,在印支期地层抬升剥蚀之后的构造运动中,研究区二叠系地层

最大埋深仅为 2 000 m,远低于初次埋深。储层镜下特征常见超大溶蚀孔发育,部分颗粒间不接触或点接触(图 4(b)),且长石铸模孔多形态完整,无明显变形(图 4(d)),均可说明溶蚀作用发生后,储层并未遭受强烈压实作用。大气水淋滤后残余的石英及少量长石颗粒抗压实能力强,后期地层埋藏浅、压实作用弱,有效保存了淋滤形成的次生孔隙。

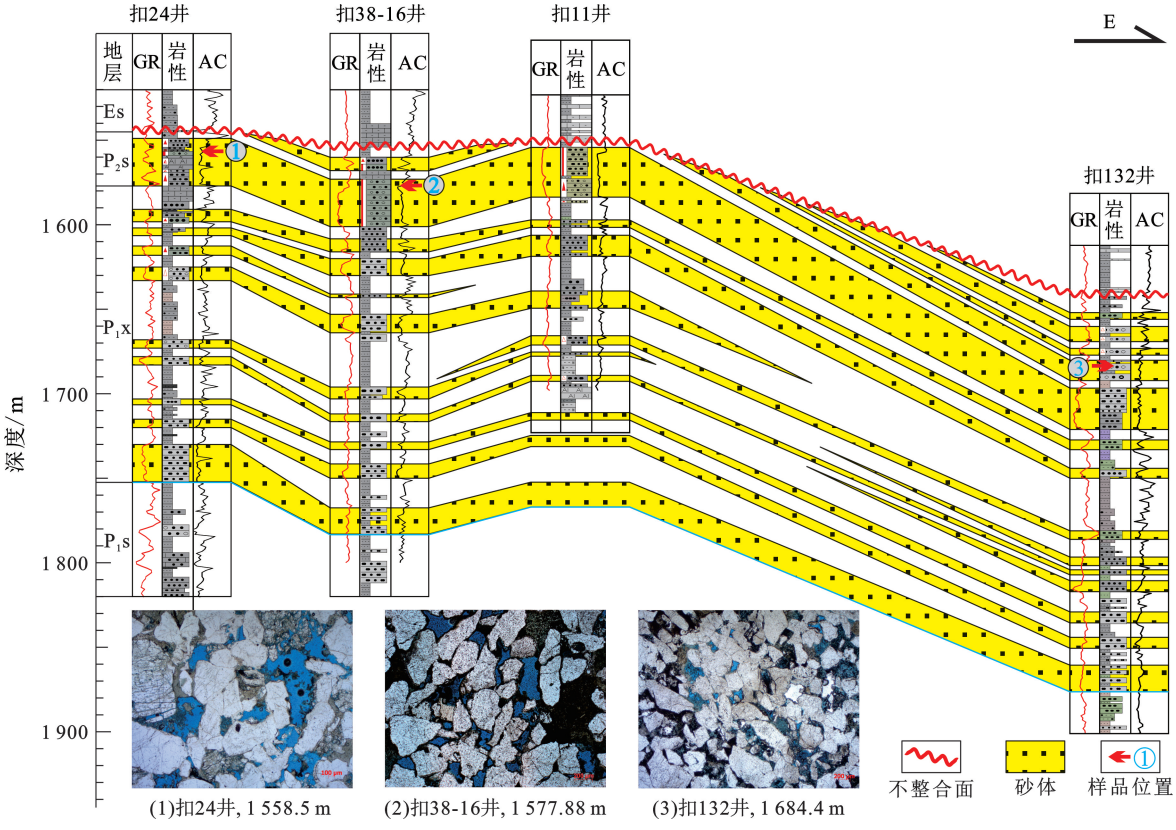


图 14　扣村潜山带储集空间剖面分布

Fig. 14　Distribution of reservoir space in Koucun buried hill

4.2　优质储层演化模式

储层成岩演化及优质储层主控因素分析表明,多期构造抬升导致的大气淡水淋滤主导了优质储层的形成。两期大气淡水携溶蚀产物的顺层流动控制了储集空间的分布模式。综合以上分析,恢复了扣村地区二叠系储层形成演化过程及模式(图 15):①初始沉降阶段,二叠系埋藏至 3 000 m,上覆三叠系;②三叠纪晚期,地层发生第一期隆升,扣村地区二叠系整体水平抬升,上覆三叠系及二叠系石千峰组遭受剥蚀,上石盒子组暴露地表并接受长时间的大气水淋滤作用,大气淡水进入储层对不稳定组分进行溶蚀,形成溶蚀孔隙,在表层形成淋滤溶解带,溶蚀产物原地下渗;③侏罗纪晚期,地层再次沉降,二叠系顶部覆盖侏罗系及白垩系地层,二叠系埋藏至 2 000 m,此阶段沉降幅度小于初次沉降,淋滤形成的次生孔隙未经强烈压实得以有效保存;④白垩纪末期构造第二次抬升,扣村及周缘地层拉分断陷,地层倾斜,潜山形成,潜山顶部中生界完全剥蚀,上石盒子组再次暴露地表,大气淡水淋滤砂体并在重力作用下沿砂层向下流动,在此过程中地层流体的溶蚀能力逐渐减弱,形成的溶蚀孔隙量逐渐降低,地层流体中携带的溶蚀产物逐渐增多,随运移距离的增加,地层水的溶蚀量与溶蚀产物的沉淀量逐渐平衡,形成过渡带,并在进一步流动的过程中沉淀大量高岭石及次生石英,形成沉淀带;⑤古近纪末期地层再次沉降,二叠系埋藏至 2 000 m,古近系直接覆盖于上石盒子组砂体之上。总的来说,二叠系两次长期的暴露剥蚀和大气淡水淋滤作用形成了大量次生溶孔,后期两次地层沉降深度均未超过初次沉降,有效保存了储集空间。该模式的提出对渤海湾盆地其他地区二叠系储层的钻前预测有一定的借鉴意义。

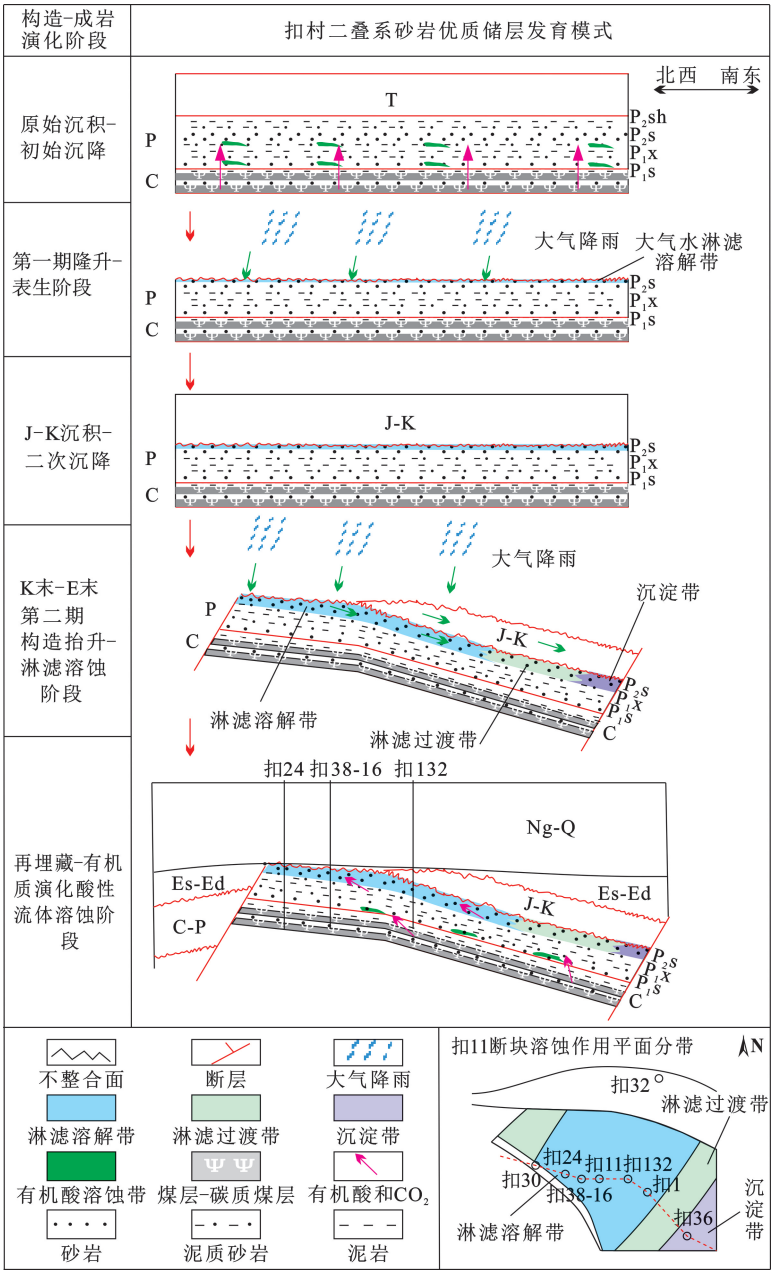


图 15　二叠系优质储层发育模式

Fig. 15　Genetic model of high quality reservoirs in Permian

5　结　论

(1)扣村潜山带二叠系优质砂岩储层成分成熟度高、结构成熟度较高,储层储集空间以次生粒间孔及粒内孔为主,储层现今主要处在中成岩 A 期,成岩作用主要包括压实作用、多期溶蚀作用、自生高岭石、自生石英及两期碳酸盐胶结作用等。

(2)扣村地区二叠系由于构造运动使地层抬升或下降,控制了储层成岩演化过程。扣村地区二叠系储层的形成主要经历了 5 个阶段,其中压实及早期碳酸盐胶结作用主要发生在早期埋藏阶段,两次构造抬升分别对应大气淡水淋滤及溶蚀产物的沉淀,晚期埋藏阶段主要发育第二期碳酸盐胶结作用。

(3)优质储层的发育受多种因素控制,成熟度高的中粗砂岩抗压实能力强,保存较多孔隙,两期大气淡水淋滤形成大量次生孔隙是优质储层发育的关键,后期埋藏深度浅,有效保存了储层物性。

(4)多期构造抬升控制了大气淡水淋滤,地层水在重力作用下形成下降流促进了砂岩中的储集物性分异,形成了自潜山顶部向翼部依次发育的溶解带、过渡带与沉淀带。

参考文献:

[1] 姚泾利,胡新友,范立勇,等. 鄂尔多斯盆地天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 天然气地球科学,2018,29(10):1465-1474.
YAO Jingli, HU Xinyou, FAN Liyong, et al. The geological conditions, resource potential and exploration direction of natural gas in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2018,29(10):1465-1474.

[2] 杨华,刘新社,杨勇. 鄂尔多斯盆地致密气勘探开发形势与未来发展展望[J]. 中国工程科学,2012,14(6):40-48.
YANG Hua, LIU Xinshe, YANG Yong. Status and prospects of tight gas exploration and development in the Ordos Basin [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6):40-48.

[3] 彭威龙,庞雄奇,向才富,等. 苏里格地区上古生界连续型致密砂岩气成藏条件及过程分析[J]. 地质科技情报,2016,35(3):180-185.
PENG Weilong, PANG Xiongqi, XIANG Caifu, et al. Conditions and process of continous tight sandstone gas accumulation of the Upper Paleozoic in Sulige Area[J]. Geological Science and Technology Information,2016,35(3):180-185.

[4] 李进步,王继平,王龙,等. 古地貌恢复及其对三角洲前缘沉积砂体的控制作用:以鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组 1^3 亚段为例[J]. 石油与天然气地质,2021,42(5):1136-1158.
LI Jinbu, WANG Jiping, WANG Long, et al. Paleogeomorphologic restoration and its controlling effect on deposition of delta-front sand bodies: a case study of Shan 1^3 sub-member of the Permian Shanxi Formation, Qingyang gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology,2021,42(5):1136-1158.

[5] 张亮. 冀中坳陷北部石炭-二叠系煤成油气成藏作用与主控因素分析[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2009.
ZHANG Liang. Study on the reservoir-forming process and exploration directions of coal-derived oil and gas from the Permo-Carboniferous in the North of Jizhong Depression [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2009.

[6] 金强,宋国奇,梁宏斌,等. 渤海湾盆地源于石炭系-二叠系的煤成气成因特征和潜力分析[J]. 地质学报,2009,83(6):861-867.
JIN Qiang, SONG Guoqi, LIANG Hongbin, et al. Characteristics of Carboniferous-Permian coal-derived gas in the Bohai Bay Basin and their implication to exploration potential[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6):861-867.

[7] 韩思杰,桑树勋,刘伟. 济阳坳陷石炭-二叠系致密砂岩气形成条件与成藏模式[J]. 石油天然气学报,2014,36(10):50-54,5.
HAN Sijie, SANG Shuxun, LIU Wei. Formation conditions and hydrocarbon accumulation patterns of tight sandstonegas reservoir of Permo-Carboniferous in Jiyang depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(10):50-54,5.

[8] 付立新,楼达,李宏军,等. 印支-燕山运动对大港探区古潜山形成的控制作用[J]. 石油学报,2016,37(sup2):19-30.
FU Lixin, LOU Da, LI Hongjun, et al. Control effect of Indosinian-Yanshan movement on the formation of buried hill in Dagang exploration area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016,37(sup2):19-30.

[9] 付立新,楼达,冯建元,等. 歧口凹陷中位序、低位序潜山地质特征及油气勘探潜力[J]. 天然气地球科学,2010,21(4):559-565.
FU Lixin, LOU Da, FENG Jianyuan, et al. Geologic features and hydrocarbon exploration potential of middle and low-buried hill in Qikou Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2010,21(4):559-565.

[10] 程鑫,周立宏,操应长,等. 黄骅坳陷大港探区下古生界碳酸盐岩潜山差异演化及优质储层成因[J]. 石油与天然气地质,2021,42(3):673-689.
CHENG Xin, ZHOU Lihong, CAO Yingchang, et al. Differential evolution and origin of high-quality reservoirs in the Lower Paleozoic carbonate buried hills in Dagang prospecting area, Huanghua Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2021,42(3):673-689.

[11] 侯中帅,陈世悦,鄢继华,等. 大港探区上古生界沉积特征与控制因素[J]. 地球科学,2017,42(11):2055-2068.
HOU Zhongshuai, CHEN Shiyue, YAN Jihua, et al. Sedimentary characteristics and control factors of Upper Paleozoic in Dagang exploration area [J]. Earth Science, 2017,42(11):2055-2068.

[12] 应凤祥,何东博,龙玉梅,等. 中华人民共和国石油天然气行业标准(SY/T5477-2003),碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京:石油工业出版社,2003:1-5.

[13] BEARD D C, WEYL P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(2): 349-369.

[14] 刘成林,朱筱敏,朱玉新,等. 不同构造背景天然气储层成岩作用及孔隙演化特点[J]. 石油与天然气地质,2005,26(6):746-753.

LIU Chenglin, ZHU Xiaomin, ZHU Yuxin, et al. Characteristics of diagenesis and pore evolution of gas reservoirs formed in different tectonic settings[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(6): 746-753.

[15] 靳子濠,周立宏,操应长,等. 渤海湾盆地黄骅坳陷二叠系砂岩储层储集特征及成岩作用[J]. 天然气地球科学,2018,29(11):1595-1606.
JIN Zihao, ZHOU Lihong, CAO Yingchang, et al. Reservoir properties and diagenesis of Permian sandstones in Huanghua depression, Bohai Bay Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(11): 1595-1606.

[16] 高志勇,冯佳睿,崔京钢,等. 深层储集层长石溶蚀增孔的物理模拟与定量计算[J]. 石油勘探与开发,2017,44(3):359-369.
GAO Zhiyong, FENG Jiarui, CUI Jinggang, et al. Physical simulation and quantitative calculation of increased feldspar dissolution pores in deep reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 359-369.

[17] 金凤鸣,张凯逊,王权,等. 断陷盆地深层优质碎屑岩储集层发育机理:以渤海湾盆地饶阳凹陷为例[J]. 石油勘探与开发,2018,45(2):247-254.
JIN Fengming, ZHANG Kaixun, WANG Quan, et al. Formation mechanisms of good-quality clastic reservoirs in deep formation in rifted basin: a case study of Raoyang sag in Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 247-254.

[18] 丁晓琪,韩玫梅,张哨楠,等. 大气淡水在碎屑岩次生孔隙中的作用[J]. 地质评论,2014,60(1):145-158.
DING Xiaoqi, HAN Meimei, ZHANG Shaonan, et al. Roles of meteoric water on secondary porosity of siliciclastic reservoirs[J]. Geological Review, 2014, 60(1): 145-158.

[19] 远光辉,操应长,贾珍臻,等. 含油气盆地中深层碎屑岩储层异常高孔带研究进展[J]. 天然气地球科学,2015,26(1):28-42.
YUAN Guanghui, CAO Yingchang, JIA Zhenzhen, et al. Research progress on anomalously high porosity zones in deeply buried clastic reservoirs in petroliferous basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(1): 28-42.

[20] 钟大康,朱筱敏,王红军. 中国深层优质碎屑岩储层特征与形成机理分析[J]. 中国科学(D 辑:地球科学),2008,38(增 1):11-18.
ZHONG Dakang, ZHU Xiaomin, WANG Hongjun. Characteristics and genetic mechanism of deep-buried clastic reservoir in China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 38(sup1): 11-18.

[21] 王艳忠,操应长,王淑萍,等. 不整合空间结构与油气成藏综述[J]. 大地构造与成矿学,2006(3):326-330.
WANG Yanzhong, CAO Yingchang, WANG Shuping, et al. Advances in research of spatial structures of unconformity [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006(3): 326-330.

[22] 邹才能,侯连华,杨帆,等. 碎屑岩风化壳结构及油气地质意义[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(12):2652-2664.
ZOU Caineng, HOU Lianhua, YANG Fan, et al. Structure of weathered clastic crust and its petroleum potential [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(12): 2652-2664.

[23] 邱隆伟,侯立新,汪丽芳. 埕 110 块碎屑岩储层物性表生作用分带性研究[J]. 油气地质与采收率,2005,12(5):16-20.
QIU Longwei, HOU Lixin, WANG Lifang. A study on the zoning of hypergenesis of physical propertiesof clastic reservoir in Cheng 110 block [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(5): 16-20.

[24] 李汶国,张晓鹏,钟玉梅. 长石砂岩次生溶孔的形成机理[J]. 石油与天然气地质,2005,26(2):93-96,102.
LI Wenguo, ZHANG Xiaopeng, ZHONG Yumei. Formation mechanism of secondary dissolved pores in feldspar sandstone [J]. Geology of Oil and Gas, 2005, 26(2): 93-96, 102.

[25] 李美蓉,宋来弟,于海鹏,等. 酸碱度对长石溶蚀及增孔效应的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(5):33-41.
LI Meirong, SONG Laidi, YU Haipeng, et al. Influence of pH value on feldspar dissolution and pore-increasing effect [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2021, 45(5): 33-41.

[26] AUGUSTIN D, BÉCHIR M, TORSTEN V, et al. Mixed hydrothermal and meteoric fluids evidenced by unusual H- and O- isotope compositions of kaolinite-halloysite in the Fe(-Mn) Tamra deposit (Nefza district, NW Tunisia) [J]. Applied Clay Science, 2018, 163: 33-45.

[27] SHEPPARD S M F, GILG H A. Stable isotope geochemistry of clay minerasl [J]. Clay Minerals, 1996, 31: 1-24.

(编辑 修荣荣)