

# 冀中坳陷杨税务潜山中生代 挤压逆冲构造及对储层发育的影响

陈树光<sup>1</sup>, 杨德相<sup>1</sup>, 田建章<sup>1</sup>, 侯凤香<sup>1</sup>, 王鑫<sup>1</sup>, 田然<sup>1</sup>,  
张建丽<sup>1</sup>, 王盛亮<sup>2</sup>

1 中国石油华北油田勘探开发研究院; 2 中国石油华北油田巴彦分公司

**摘要** 为了查明冀中坳陷北部中生代逆冲构造的发育期次以及逆冲构造对潜山储层发育的改造作用,利用新处理的高精度三维深度域地震数据,结合钻井和野外露头资料,开展了深潜山内幕断裂体系(尤其是逆冲构造)的精细解释以及逆冲构造对潜山储层发育影响的研究。结果表明:冀中坳陷北部中生代至少发育2期规模较大的逆冲构造,即印支期受到扬子板块向北俯冲作用的影响而形成的近EW向逆冲构造,燕山早期受到中国东部古太平洋板块NW向俯冲作用的影响而形成的NE向逆冲构造。利用钻井岩心和测井成像等资料,证实了杨税务潜山逆冲构造对于碳酸盐岩深潜山储层的裂缝发育和多期、多种形式岩溶作用的发生具有重要影响。

**关键词** 逆冲构造; 裂缝; 岩溶作用; 中生代; 杨税务潜山; 冀中坳陷

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

## 0 前言

逆冲构造(或冲断构造)是在区域挤压应力作用下形成的一种构造样式<sup>[1]</sup>。该构造若出现在早期伸展应力作用下形成的正断层的基础上,后发育挤压逆冲构造,这两者的叠合便构成了正反转构造;若该构造形成在前,后出现区域拉伸应力环境,发育伸展正断层,这种先逆后正的构造现象便构成了负反转构造<sup>[2-3]</sup>。渤海湾盆地位于中国东部,在构造上属于华北板块,中生代期间南邻扬子板块,东接古太平洋板块,历经多次构造运动,盆地应力场也发生数次伸展和挤压的转换,使得盆地在该时期普遍发育逆冲构造(或反转构造)。在过去几十年尤其是近十余年的油气勘探中,很多学者已先后在济阳坳陷、黄骅坳陷、渤中坳陷和下辽河坳陷等地区对逆冲构造(尤其是逆冲反转构造)开展了相关研究,探讨了逆冲反转构造的几何学、运动学特征及其对油气成藏的控制作用<sup>[4-12]</sup>,但有关冀中坳陷反转构造及早期逆冲构造(未发生负反转)的研究还未见报道。以往认为冀中坳陷北部杨税务潜山及内幕仅发育正断层<sup>[13]</sup>,潜山油气运移和聚集主要受正断层活动影响,

因此,在控山断裂附近部署了WG1井、J24井等一批探井,但均未取得突破。中国西部盆地逆冲构造对致密储层裂缝的形成机理及实验模拟等方面的研究表明,逆冲构造可导致致密储层更易形成裂缝<sup>[14-16]</sup>。近年来,通过加强地震资料深度域处理及油气成藏理论主控因素分析,新提出了杨税务潜山中生代发育多期挤压逆冲构造,这些逆冲构造对潜山及内幕储层裂缝的形成以及岩溶的发生都起到了非常重要作用,是潜山油气成藏的关键所在。基于此认识,相继在杨税务潜山部署AT1X井、AT2X井、AT3井、AT4X井、AT5X井、AT6X井等6口重点井,钻探证实了逆冲构造及对储层发育的影响,并在奥陶系潜山多个层段获得高产工业气流,实现了杨税务潜山勘探的整体突破。

本次研究利用新处理的高精度三维深度域地震数据,结合岩心、钻井和野外露头资料,通过井震结合精细构造解释和区域动力学背景分析,对冀中坳陷北部深潜山及内幕逆冲构造进行了识别与解释,分析该地区逆冲构造发育时期及期次,探讨其形成的动力学背景及对潜山碳酸盐岩储层的改造作用,以期为盆地演化恢复及深潜山油气藏风险勘探提供依据和支撑。

收稿日期: 2018-11-13; 改回日期: 2019-09-17; 网络发表日期: 2019-12-07

本文受中国石油天然气股份有限公司重大专项下属课题“潜山及内幕油气富集规律及勘探关键技术研究”(编号:2017E-1501)资助

**第一作者:** 陈树光,博士,高级工程师,主要从事地质综合研究和含油气盆地构造解析。通信地址: 062550 河北省任丘市会战南道局机关小区2号办公楼; E-mail: wty\_csg@petrochina.com.cn

## 1 地质概况

冀中坳陷北部奥陶系深潜山主要指埋深大于4 500 m的潜山,本次研究主要以河西务潜山带中北部的杨税务潜山为重点研究区。杨税务潜山位于

廊固凹陷东部,三面环洼(即北部的桐南洼槽,西部的韩村洼槽,东部的大孟庄洼槽),属于受东部的河西务断层和西部的杨税务断层控制的“地垒”型潜山(图1),现今构造整体呈南高北低、东高西低的特征(图2),勘探面积约410 km<sup>2</sup>。

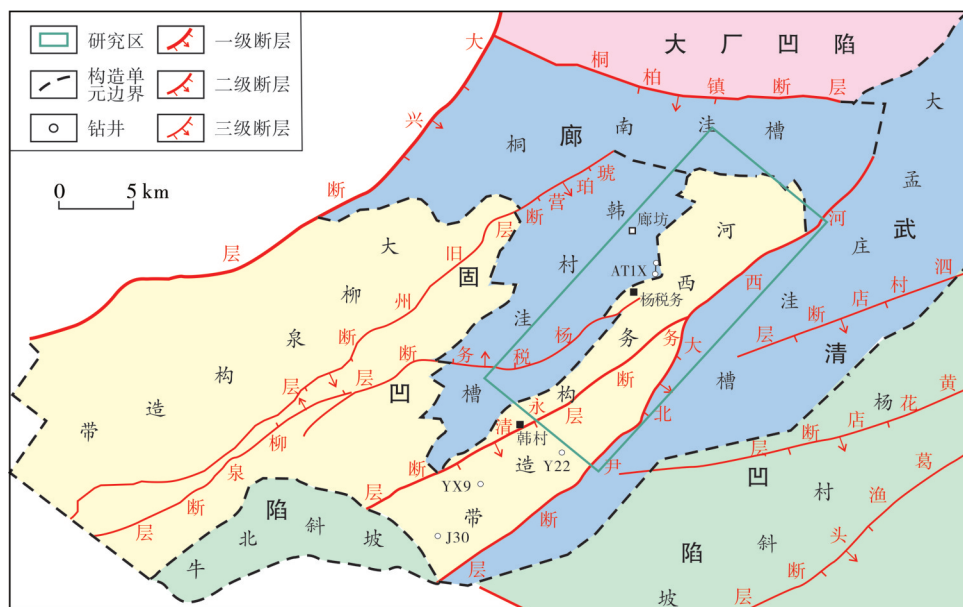


图1 冀中坳陷廊固凹陷构造单元图

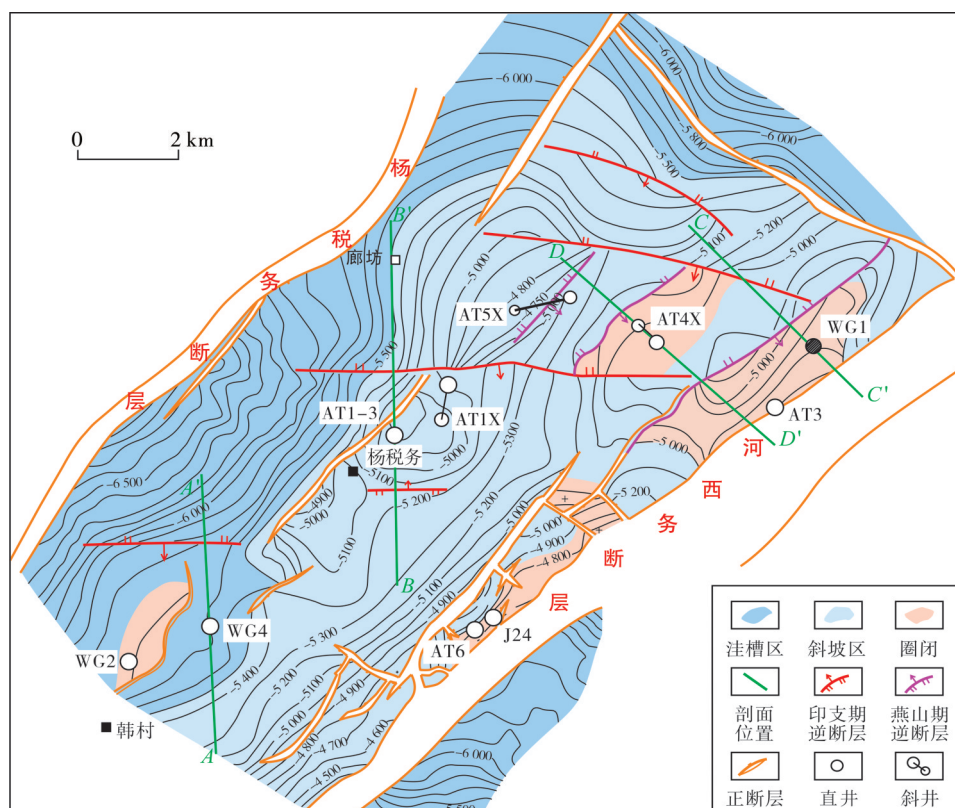


图2 冀中坳陷杨税务潜山奥陶系顶面构造图



杨税务潜山地层岩石组合包括太古宇的变质岩,中新元古界和下古生界的碳酸盐岩,以及石炭系一二叠系和新生界的碎屑岩,研究区主要目的层为中下奥陶统,包括峰峰组( $O_2f$ )、马家沟组( $O_2m$ )、亮甲山组( $O_2l$ )和冶里组( $O_2y$ )。针对潜山地层在地震上主要识别解释了新生界底界面( $Tg$ )、石炭系底界面( $Tg_2$ )、奥陶系底界面( $Tg_3$ )和寒武系底界面( $Tg_4$ )。研究区缺失中生界、泥盆系和志留系,产油层段主要为马家沟组和亮甲山组。

## 2 逆冲构造的识别及特征

逆冲构造的识别主要通过地震剖面的解释、野外露头的观察以及钻井岩心观察和地层对比分析等实现<sup>[17]</sup>。但每种方法均存在一定的局限性:通过岩心观察或地层对比分析,发现地层有重复现象,从而证实在某个井点处的某个深度发育逆断层,但却难以刻画逆断层的发育时间以及展布;野外露头观察能证实逆冲构造的存在,甚至根据地层产状及接触关系能判别逆冲构造的发育时期及俯冲方向,但无法证实盆地内部逆冲构造的规模及展布;受地震成像效果和地震分辨率的限制,在逆冲构造规模和幅度不是太大的情况下,地震解释往往存在多解性和不确定性。本文综合应用了上述3种方法,通

过相互佐证,进而明确研究区中生代逆冲构造的特征及展布。

### 2.1 野外露头观察

据河北省区域地质志<sup>[18]</sup>介绍,区调人员在冀中拗陷西部的太行山北段野外露头发现太古宇逆冲推覆于寒武系、奥陶系之上,根据残留地层分析,认为该逆冲变形发生于中生代,这说明研究区在中生代确实发生过挤压逆冲现象。另外,对北京门头沟区的下苇甸—妙峰山背斜构造进行了详细观测(图3a):该背斜西起下苇甸,经丁家滩至妙峰山,延伸达10 km以上;背斜轴迹为SEE向,核部最老地层在下苇甸为青白口系景儿峪组,向东逐渐变为寒武系、奥陶系、石炭系,区域普遍缺失二叠系和三叠系。根据区域动力学背景、背斜走向及地层展布特征,可初步推断该背斜及逆冲构造是在印支期近SN向挤压作用下形成的。在北京房山地区的野外露头观察(图3b),发现在侏罗系内部存在SE向俯冲的逆断层,结合区域动力学背景,推断为燕山早期(侏罗纪末)在区域NW—SE向挤压作用下形成的逆冲构造。由此可见,在冀中拗陷北部北京周边地区的野外露头证实研究区至少存在2期不同方向的逆冲构造。

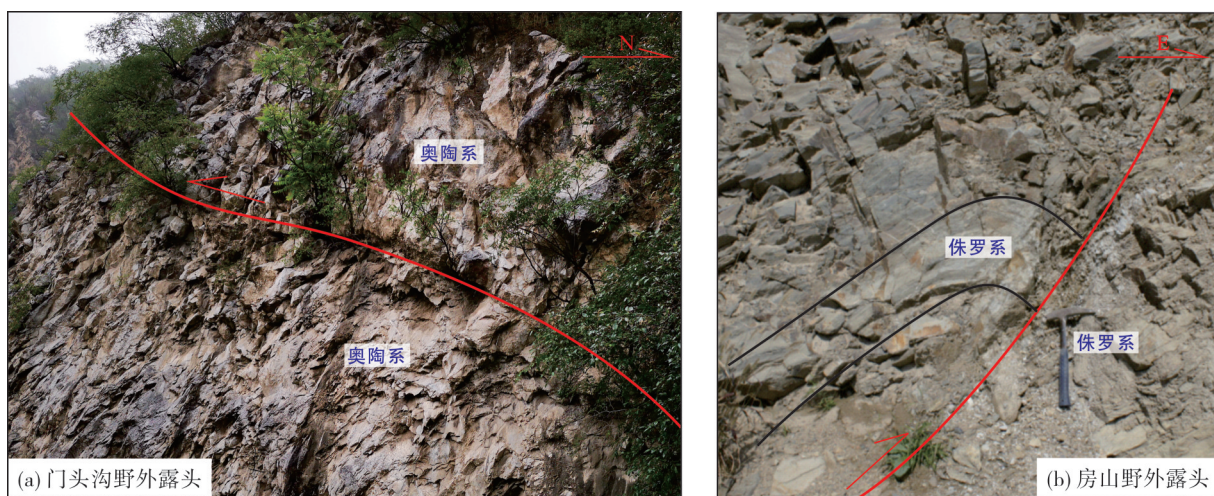


图3 北京门头沟地区(a)和房山地区(b)野外露头逆冲构造特征

### 2.2 钻井地层对比分析

通过对冀中拗陷北部钻遇的深潜山钻井和野外露头实测剖面的地层划分与对比分析,认为寒武系长山组+崮山组岩性为灰色中一薄层状泥质灰岩、含

泥白云质条带灰岩、叠层石灰岩,电性表现为齿状高伽马、低电阻率的特点,沉积环境以低能的潮下带为主;寒武系凤山组沉积期,水体深度略降,粉晶灰岩与竹叶状灰岩较为发育,电性表现为低伽马、高电阻率的特点,沉积环境以中高能潮间带为主。

对已钻 AT4X 井测井曲线和岩性进行对比分析,发现该井在寒武系上部的凤山组和长山组+崮山组地层出现了重复现象(图4),重复地层厚度达200余米,表明穿过该井的逆冲断层的断距至少在200 m以上,为一条较大幅度和规模的逆冲断裂。由此,充分证实了杨税务潜山内幕早期确实发生了较大规模的逆冲构造。

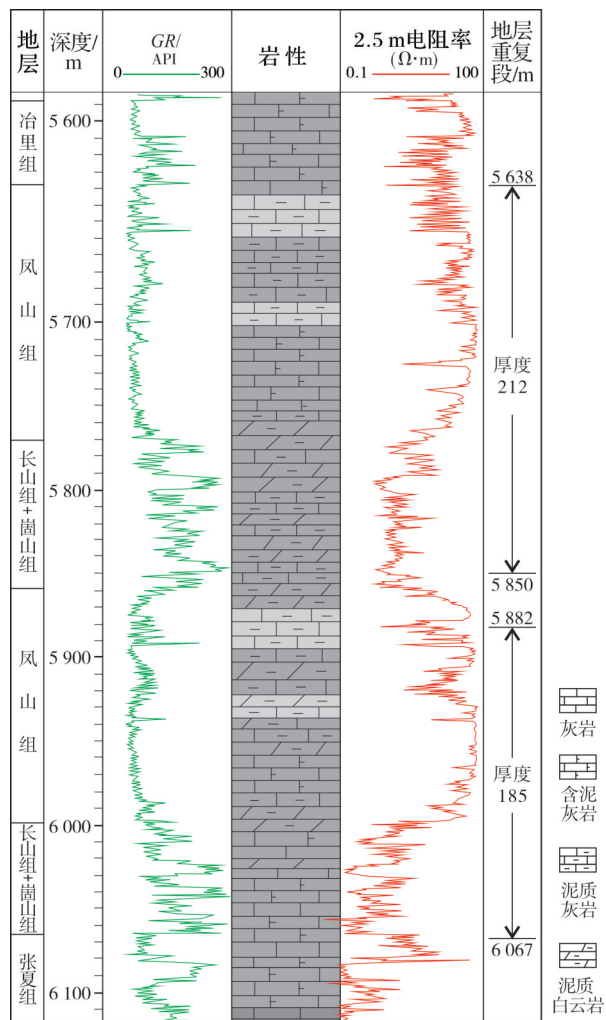


图4 冀中坳陷杨税务潜山AT4X井寒武系上部地层重复现象

## 2.3 地震剖面精细解释

根据前面野外露头观察和实际钻井分析,证实杨税务潜山内幕在中生代发育逆冲构造,而要落实逆冲构造的期次、展布特征,则需要地震剖面的精细识别与解释。由于研究区潜山埋深大,受到地震资料品质及成像效果的限制,逆冲构造特征在地震上并不是非常明显。为此,本文提出了深潜山地震识别逆冲构造的3个依据:①地层产状是

否发生明显变化,逆冲断层两侧地层夹角是否小于 $180^\circ$ ;②逆冲断层上盘地层高于下盘地层,上盘地层厚度是否明显减薄;③逆冲断层两侧地震相特征是否发生突变。基于这3个依据,本次研究识别出了2期具有不同逆冲方向和展布方向的逆冲构造。

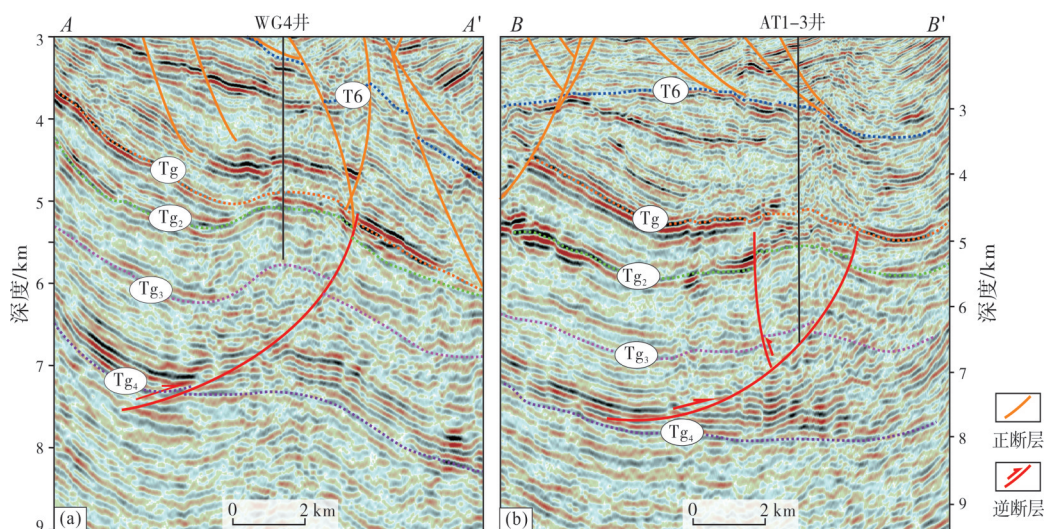
### 2.3.1 印支期逆冲构造

通过对冀中坳陷北部杨税务深潜山及内幕构造进行精细解释,发现经过WG4井的南北向地震剖面的中古生代地层具有隆凹相间的构造特征,且具有从基底宽缓微隆到潜山顶面隆升褶皱地层变陡、角度变大的趋势。仔细观察地震相特征及地层产状变化,还可发现背斜具有挤压冲断的迹象,且在背斜区潜山顶部,石炭系一二叠系的地层厚度明显减薄(图5a)。据此,识别并解释出了一条过WG4井由南向北逆冲的断层,并厘定该逆冲断层的平面展布为近EW向,结合区域动力学背景及野外露头观察,综合判断该逆冲断层因印支期SN向挤压而形成。另外,基于前面提到的逆冲构造的3个识别依据,在过AT1-3井的南北向剖面上(图5b),识别并解释了2条逆冲断层,其中一条是由南向北俯冲形成的逆冲断层,为主逆冲断层;另一条是在主逆冲断层的基础上由反向逆冲形成的。这2条逆冲断层的上盘地震相表现为弱振幅、中高频、低连续的特点,与下盘地层的强振幅、低频、高连续形成鲜明对照。

### 2.3.2 燕山早期逆冲构造

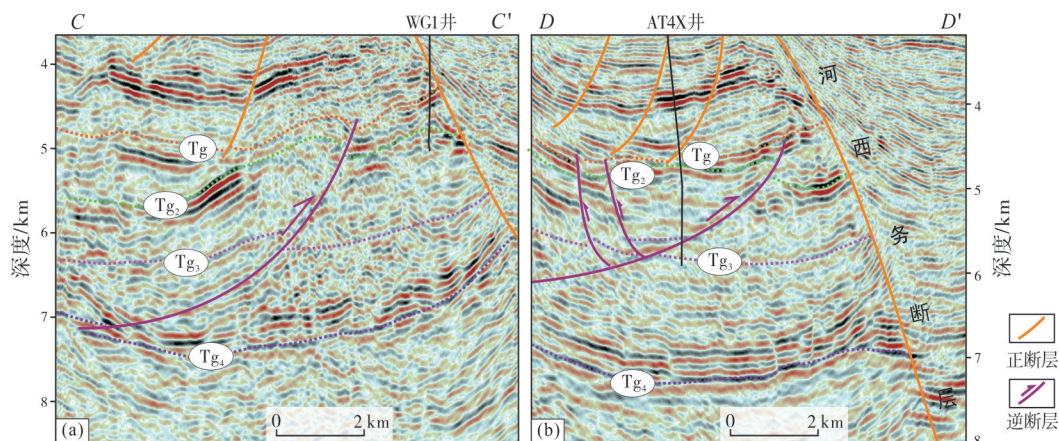
在冀中坳陷北部杨税务深潜山及内幕,除了发育印支期近EW走向的逆冲构造外,在NW—SE方向上同样发现多条逆冲现象更为显著的逆冲构造。如图6a所示,逆冲断层上盘地层产状为中高角度的北西倾向,与下盘近水平展布的地层特征形成强烈反差;在逆冲断层上盘,由NW向SE到逆冲断层处,潜山顶部石炭系一二叠系厚度明显减薄;同时逆冲断层上盘地震相特征与下盘地层出现了突变。这些特征均表明该逆冲断层落实可靠。这些逆冲断层在平面上NE向展布,结合区域动力学背景以及露头观察结果,推测该期逆冲构造发生于燕山早期(侏罗纪末期)。另外,在过AT4X井的NW—SE向地震剖面上(图6b)解释出了3条逆冲断层:一条主逆冲断层与过WG1井解释的逆冲断层属于同一条,另外2条为主逆冲断层的反向调节逆冲断层。该主逆冲断层穿过AT4X井的位置与钻井结果极为吻合,说明本次识别逆冲断层的原则方法是有效的、地震资料是可信的。





T6 沙河街组三段底界; Tg 新生界底界; Tg<sub>2</sub> 石炭系底界; Tg<sub>3</sub> 奥陶系底界; Tg<sub>4</sub> 寒武系底界。

图5 冀中拗陷杨税务潜山过WG4井(a)和AT1-3井(b)地震剖面的逆冲构造特征  
剖面位置见图2



Tg 新生界底界; Tg<sub>2</sub> 石炭系底界; Tg<sub>3</sub> 奥陶系底界; Tg<sub>4</sub> 寒武系底界。

图6 冀中拗陷杨税务潜山过WG1井(a)和AT4X井(b)地震剖面的逆冲构造特征  
剖面位置见图2

### 2.3.3 逆冲断裂平面展布

通过对杨税务潜山地震资料的精细解释,识别出了5条近EW向展布的印支期逆冲断层和3条NE—SW走向的燕山早期逆冲断层(图2)。总体上看,在杨税务潜山南部的印支期逆冲构造保存较好,特征较为显著。在杨税务潜山的北部,由于受燕山期的逆冲等后期改造作用影响,印支期逆冲构造特征已不易识别,而燕山期逆冲构造由于发育时间较印支期构造晚而变得更为清楚。因此,杨税务潜山是在中生代经历了2期逆冲构造的改造作用形成的。目前的勘探实践表明,在杨税

务潜山中北部2期逆冲构造的叠合区储层更为发育,已钻AT1X井、AT3井(井位见图2)已保持较长时期的高产稳产。

## 3 逆冲构造对储层发育的影响

杨税务潜山碳酸盐岩储层孔隙度较低(平均1.0%~3.3%),储层类型包括孔隙型(储集空间有晶间孔、粒内孔、粒间溶孔)、裂缝型和孔隙-裂缝型等3种<sup>[13]</sup>。其中,孔隙包括原生孔和后期溶蚀孔,裂缝主要为后期的构造缝以及溶蚀作用形成的缝洞。因此,本文主要分析逆冲构造对裂缝发育和岩溶作用的控制作用。



### 3.1 逆冲构造有利于深潜山裂缝的发育

构造作用是沉积盆地低渗透裂缝型储层形成的主要因素,对储层改善和油气成藏起着非常重要的作用。为此,很多学者针对低渗透储层构造裂缝的成因类型及其形成地质条件开展过卓有成效的研究。裂缝形成时期的主应力产状决定了裂缝的走向,构造应力的的大小控制着裂缝的发育程度<sup>[19]</sup>。

自然界中构造裂缝(剪切裂缝和扩张裂缝)大多形成于挤压应力环境,少数裂缝(拉张裂缝)形成

于伸展应力环境。中生代印支期—燕山早期构造活动正是表现为区域挤压造山运动,普遍发育褶皱逆冲构造,使研究区形成古隆起的构造雏形,并发育多条近EW向和NE向的逆冲断层。在逆断层发育地区,在距离逆冲断层2倍断距内,存在明显的应力集中,且在逆冲断层主动盘(上盘)极易发生扩张裂缝和剪切裂缝,这在物理模拟实验中已得到证实<sup>[14]</sup>。在研究区的钻井岩心中也发现大量中高角度的扩张缝和剪切裂缝(图7),这些裂缝促进了研究区碳酸盐岩裂缝储层的发育。

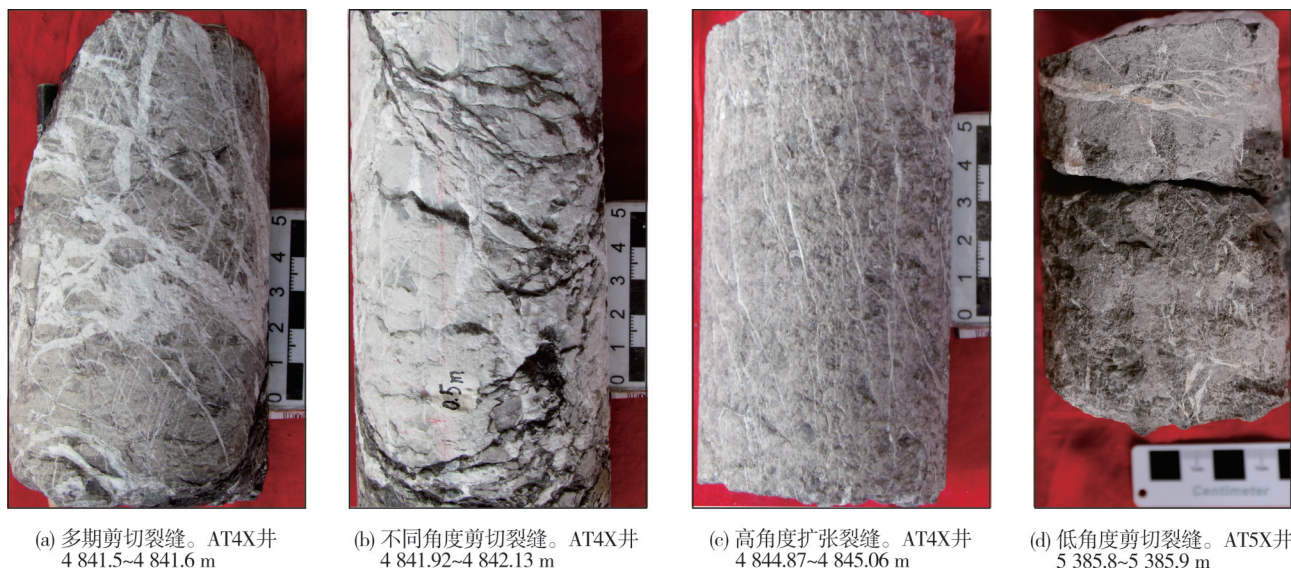


图7 冀中坳陷杨税务潜山中奥陶统峰峰组钻井岩心裂缝类型

### 3.2 逆冲构造有利于深潜山岩溶作用

研究区潜山岩溶作用主要表现为4种类型,即表生期潜山岩溶作用、潜山内幕顺层岩溶作用、受断裂控制的岩溶作用和埋藏岩溶作用。其中,表生期岩溶作用发生于潜山暴露地表以后,主要影响潜山上部地层;潜山内幕顺层岩溶作用往往发生于构造运动导致地层形成逆冲褶皱或出现地层倾斜以及断裂发育的部位;大气降水顺着断裂进入潜山内幕,在遇到内幕易溶蚀层,形成溶蚀孔、洞、缝;在地层倾斜部位,内幕层溶蚀水易于流动,从而可能发育溶蚀角砾岩。从研究区钻井岩心及成像测井中可看出,靠近河西务大断层的WG1井钻遇溶蚀角砾岩,有些角砾岩甚至还具有一定程度的磨圆(图8)。

冀中北部杨税务潜山经历了多期构造演化,印支期之前盆地构造运动以垂向升降为主,地势总体较为

平坦,断裂不发育。加里东期—海西期(图9c),潜山以发育表生期岩溶作用为主,流体主要来自大气降水,地层在岩溶作用下发生塌陷,形成角砾岩,总体表现为上部溶蚀作用强,形成溶蚀孔、缝及角砾岩,下部溶蚀作用弱。印支期(图9b),由于扬子板块向北俯冲于华北板块之下,致使华北板块尤其是渤海湾盆地发生由南向北的挤压作用,造成大规模逆冲褶皱现象,并导致本来平坦的地层发生褶皱倾斜,地层产状开始形成一定角度;另外发育多条逆冲断裂,使潜山内幕地层在逆冲断裂处直接暴露地表,这不仅有利于发生表生岩溶作用,还有利于发生顺层岩溶作用以及受断裂控制的岩溶作用。燕山期(图9a),华北板块受到古太平洋板块俯冲作用影响,渤海湾盆地发生了NW—SE向挤压逆冲作用,使潜山及内幕逆冲构造更为发育,从而更有利于多种岩溶作用的形成,致使杨税务潜山内幕溶蚀孔、洞、缝均较为发育。



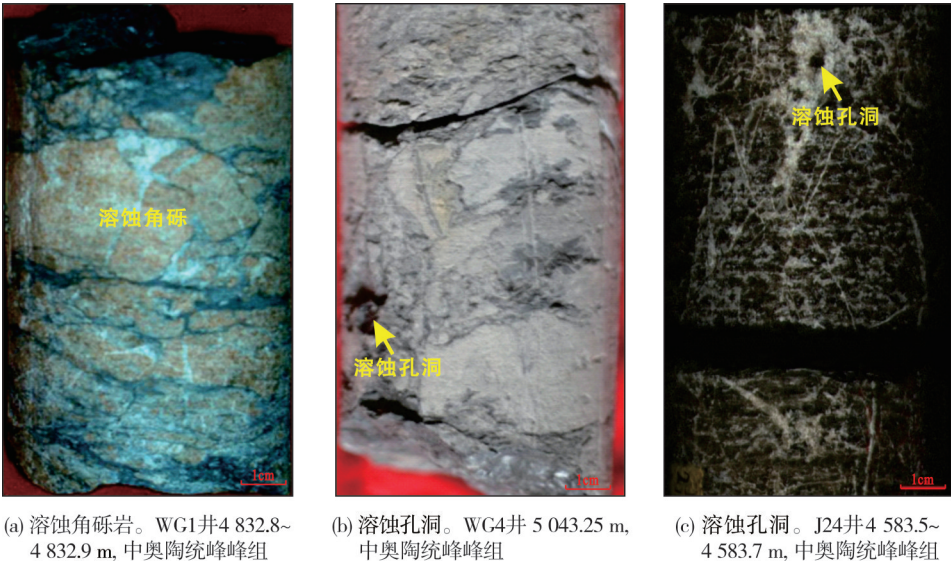


图8 冀中坳陷杨税务潜山中奥陶统峰峰组钻井岩心岩溶特征

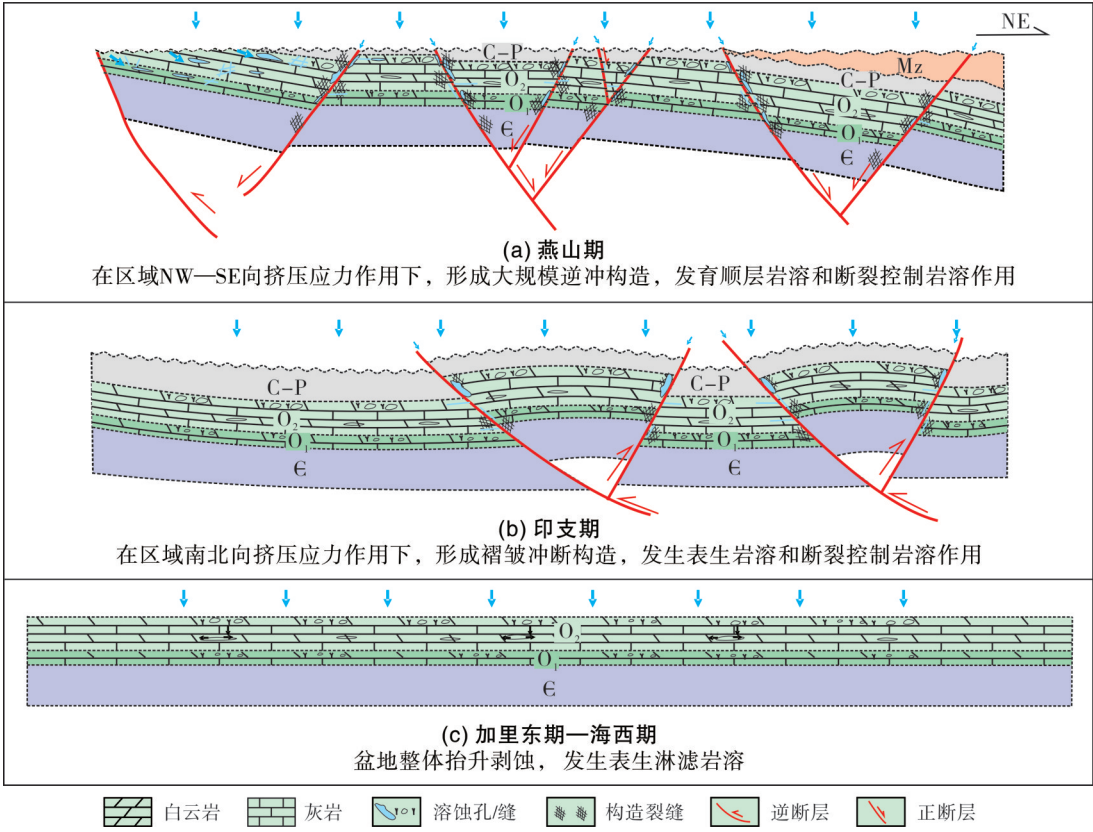


图9 冀中坳陷杨税务潜山构造演化及对潜山岩溶作用的模式

4 结 论

(1)利用新处理的三维深度域地震数据,结合钻井岩心、测井成像以及野外露头等资料,开展了冀中坳陷北部深潜山内幕逆冲构造的精细解释及

逆冲构造对潜山储层发育影响的研究,在此基础上,提出了深潜山地震识别逆冲构造的3个依据,认为杨税务潜山在中生代主要发育2期逆冲构造,分别为印支期南北向挤压形成的近EW向逆冲构造和燕山早期NW—SE向挤压形成的NE向逆冲构造。

(2)根据新解释的逆冲构造的展布特征,分析了冀中坳陷北部杨税务潜山逆冲构造对深潜山碳酸盐岩储层裂缝发育及岩溶作用的影响,认为逆冲构造有利于深潜山扩张裂缝和剪切裂缝的发育,并对多种类型岩溶(尤其是顺层岩溶、受断裂控制的岩溶)作用具有很强的影响。这一认识在已钻井中得到证实,因此对下步开展有效储层预测及风险探井的钻探部署具有很好的现实指导意义。

#### 参考文献

- [1] 姚超,焦贵浩,王同和,等.中国含油气构造样式[M].北京:石油工业出版社,2004:318-403.
- [2] WANG Buqing, CHEN Hanlin, YANG Shufeng, et al. Geometry and kinematics of Late Cretaceous inversion structures in the Jiuquan Basin, western China [J]. Cretaceous research, 2005, 26(2):319-327.
- [3] LOUIS L, ROBION P, DAVID C. A single method for the inversion of anisotropic data sets with application to structural studies [J]. Journal of structural geology, 2004, 26(11): 2065-2072.
- [4] 任建业,于建国,张俊霞.济阳坳陷深层构造及其对中新世盆地发育的控制作用[J].地学前缘,2009,16(4):117-137.
- [5] 陈树光,任建业,辛云路,等.渤海湾沙北地区盆地结构构造及其演化分析[J].大地构造与成矿学,2015,39(5):816-827.
- [6] 阳怀忠,任建业,陆金波.东营凹陷负反转构造样式及其运动学特征[J].地球科学(中国地质大学学报),2009,34(3):493-501.
- [7] 强昆生,吕修祥,周心怀,等.渤海辽东湾坳陷 JX1-1 反转构造与油气成藏史[J].矿物岩石,2012,32(4):31-40.
- [8] 郝慧,周建勋,姜永旭,等.黄骅坳陷王官屯地区古近纪逆冲断层分析[J].科学技术与工程,2011,11(29):7071-7074.
- [9] 朱梓强,卢刚臣,李玉海,等.北大港潜山带翼部成藏特点及勘探前景[J].石油地球物理勘探,2015,50(1):150-155.
- [10] 侯旭波,吴智平,李伟.济阳坳陷中生代负反转构造发育特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(1):18-23.
- [11] 杨克基,漆家福,余一欣,等.辽中凹陷反转构造及其对郯庐断裂带走滑活动的响应[J].岩石学报,2016,32(4):1182-1196.
- [12] 彭靖淞,徐长贵,吴奎,等.郯庐断裂带辽东凸起的形成与古辽中洼陷的瓦解[J].石油学报,2015,36(3):274-285.
- [13] 杜金虎,何海清,赵贤正,等.渤海湾盆地廊固凹陷杨税务超深超高温奥陶系潜山油气勘探重大突破实践与启示[J].中国石油勘探,2017,22(2):1-12.
- [14] 曾联波,漆家福,王永秀.低渗透储层构造裂缝的成因类型及其形成地质条件[J].石油学报,2007,28(4):52-56.
- [15] 曾联波,漆家福,王成刚,等.构造应力对裂缝形成与流体流动的影响[J].地学前缘,2008,15(3):292-298.
- [16] 祖克威,曾联波,赵向原,等.断层转折褶皱剪切裂缝发育模式探讨[J].地质力学学报,2014,20(1):16-24.
- [17] 李洪博,梅廉夫.反转构造研究进展及其盆地一体化研究思路[J].地质科技情报,2009,28(5):12-21.
- [18] 河北省地质矿产局.河北省北京市天津市区域地质志[M].北京:地质出版社,1991:192-218,559-565.
- [19] FINKBEINER T, ZOBACK M, FLEMINGS P, et al. Stress, pore pressure, and dynamically constrained hydrocarbon columns in the South Eugene Island 330 field, northern Gulf of Mexico [J]. AAPG bulletin, 2001, 85(6): 1007-1031.

编辑:黄革萍

## The Mesozoic compressional thrust structure and its effect on reservoir development in Yangshuiwu buried hill, Jizhong Depression

CHEN Shuguang, YANG Dexiang, TIAN Jianzhang, HOU Fengxiang, WANG Xin, TIAN Ran, ZHANG Jianli, WANG Shengliang

**Abstract:** In order to ascertain the development stages of the Mesozoic thrust structures in the northern Jizhong Depression and the influence of the thrust structures on the development of buried hill reservoirs in different periods, the deep buried internal fracture system (especially the thrust structure) was finely interpreted and the balanced sections were recovered by using the newly processed high-precision three-dimensional depth seismic data, drilling data and field outcrops data. It is revealed that at least two large-scale thrust structures developed in the northern part of Jizhong Depression in Mesozoic, that is, the near EW thrust structure formed during Indosinian period under the influence of the northward subduction of the Yangtze Plate, and the NE thrust structure formed in the early Yanshanian stage under the influence of NW subduction of the Paleo-Pacific plate in eastern China. Based on the data of drilling cores and well logging imaging, it is verified that the thrust structure has an important influence on the fracture development of carbonate deep buried hill reservoir and the occurrence of various karstification in Yangshuiwu buried hill.

**Key words:** thrust structure; fracture; karstification; Mesozoic; Yangshuiwu buried hill; Jizhong Depression

**CHEN Shuguang**, First author; PhD, Senior Engineer, engaged in petroleum geology and structural analysis of petroliferous basins. Add: No. 2 Office Building, Bureau Office Community, South Road of Huizhan, Renqiu, Hebei 062550, China