

渤海湾盆地徐水凹陷地质结构与构造演化

单帅强¹,张煜颖¹,张锐锋²

[1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083;2. 中国石油华北油田分公司,河北任丘 062552]

摘要:徐水凹陷处于渤海湾盆地西部,西侧以太行山山前断层为界与太行山隆起隔开。为了全面认识徐水凹陷的形成过程,更好地服务于区内的油气勘探工作,综合利用研究区内的钻井和地震资料,对徐水凹陷的地质结构进行系统研究。通过对凹陷内的地震剖面进行精细解释,刻画区内主要断裂的发育特征;运用平衡剖面技术,恢复了徐水凹陷古近纪以来的演化过程。结果表明,徐水凹陷新生界内发育古近系底部和新近系底部2个区域性不整合面,据此划分出3套构造层,即基底构造层、古近系构造层和新近系-第四系构造层。受控于NE向的太行山山前断层和NWW向的涞水断层,徐水凹陷表现出西断东超和北断南超的构造格局。研究认为,新生代以来徐水凹陷的构造演化经历了强烈断陷阶段、断陷持续发育阶段、断-拗过渡阶段和拗陷阶段。凹陷内的断陷活动于古近纪早期开始发育,持续至新近世晚期,并具有幕式活动的特征。

关键词:地质结构;构造层;构造演化;太行山山前断层;冀中坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Geologic architecture and tectonic evolution of Xushui Sag, Bohai Bay Basin

Shan Shuaiqiang¹, Zhang Yuying¹, Zhang Ruifeng²

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Huabei Oilfield Company Ltd., PetroChina, Renqiu, Hebei 062552, China]

Abstract: The Xushui Sag, located in the western Bohai Bay Basin, is separated from the Taihang Mountain uplift by the Taihang Mountain piedmont fault to its west. In order to improve the understanding of the formation of the sag and facilitate petroleum exploration in the region, we systematically studied the geologic architecture of Xushui Sag through the drilling and seismic data. Characteristics of the major faults in the study area were revealed based on fine interpretation of the seismic profiles within the sag. The post-Paleogene tectonic evolution process of Xushui Sag was reconstructed via the balanced cross-section technique. The results show that there are two regional unconformities in the Cenozoic in the Xushui Sag, one being at the base of the Paleogene and the other being at the base of the Neogene. According to these two unconformities, three tectonic layers, namely the basement, the Paleogene and the Neogene-Quaternary layers, are subdivided. The structural framework of the study area with faults occurring in its west and north and overlapping occurring in its east and south, is controlled by the NE-trending Taihang Mountain piedmont fault and the NWW-trending Laishui fault. This study demonstrates that the post-Cenozoic tectonic evolution of the study area can be divided into four stages: intense rifting stage, continuous rifting stage, transitional stage from rifting to depression and depression stage. Rifting in the Xushui Sag, characterized by episodic activities, began to grow in the Early Paleocene and proceeded until the Late Oligocene.

Key words: geologic architecture, tectonic layer, tectonic evolution, Taihang Mountain piedmont fault, Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

地质结构研究是开展盆地分析的基础,也是认识盆地形成演化和相关资源、能源赋存的重要窗口。盆地的地质结构主要包括由区域性不整合面限定的构造层和被断层(带)切割的断块(断裂系统)^[1]。

徐水凹陷位于渤海湾盆地冀中坳陷,西侧紧邻太行山隆起。其地质结构与构造演化的研究对于分析区内油气成藏要素的发育情况有着重要的意义,也将为揭示太行山山前断层的发育特征提供线索。此外,由

收稿日期:2018-05-15;修订日期:2018-07-16。

第一作者简介:单帅强(1988—),男,博士研究生,含油气盆地分析。E-mail:ssqcugb@sina.com。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0601405-03)。

于雄安新区在构造位置上处于徐水凹陷的东部(图 1),研究徐水凹陷的地质结构还将有助于全面分析雄安新区所在区域的地壳稳定性。前人从断裂的几何特征和活动性入手,在徐水凹陷及邻区开展了相应的工作,并在断裂级次、发育时间和活动强度等方面取得了重要认识^[2-3]。最新的航磁结果也局部显示了徐水凹陷基底的起伏特征^[4]。然而,目前的研究尚未对徐水凹陷的地质结构开展系统的分析,构造演化方面的研究也有待深入^[5]。

本文利用高精度的地震和钻井资料,并结合区域地质填图成果,借鉴前人对盆地构造格局和断裂发育特征的研究方法^[6-8],对徐水凹陷的地质结构和构造演化进行研究。通过“井、震”结合,建立了研究区的地层系统,并根据区域性不整合面的发育,对构造层进行划分;在对地震剖面进行精细解释的基础上,揭示了主要断裂的发育特征;运用平衡剖面技术,恢复了徐水凹陷古近纪以来的构造演化过程,并探讨了其构造演化的控制因素。

1 地质背景

1.1 构造位置及区域构造演化

徐水凹陷位于渤海湾盆地冀中坳陷西部凹陷带的中部,西邻太行山隆起,东接容城凸起,南连保定凹陷,

北临廊固凹陷、大兴凸起和北京凹陷(图 1),勘探面积约 900 km²。

作为渤海湾盆地的一部分,徐水凹陷在大地构造位置上处于华北克拉通的东部^[9-10](图 1)。徐水凹陷及邻区完整地经历了华北克拉通太古宙至中生代的演化过程^[11]。晚中生代以来,在太行山前断层的控制下,冀中坳陷西部凹陷带开始发育^[12-15],断陷活动持续至古近纪末期^[16-17]。新近纪—第四纪,徐水凹陷及邻区进入热沉降阶段^[17-18]。

1.2 地层发育特征

钻井资料揭示,徐水凹陷内发育的新生代地层自下至上包括古近系孔店组、沙河街组、东营组,新近系明化镇组和第四系平原组(图 2,图 3)。其中,沙河街组由下到上分为沙(沙河街组)四段、沙三段、沙二段和沙一段。孔店组主要包括砂岩和泥岩,底部发育砾岩,厚度 247 ~ 1 380 m;沙四段以泥岩为主,夹有薄层砂岩,层厚 0 ~ 746 m;沙三段—沙二段发育砂泥岩互层,沉积环境为河流相和滨浅湖相,地层厚度为 0 ~ 1 807 m;沙一段以浅湖相泥岩和砂岩为主,包括页岩,厚度变化范围在 0 ~ 1 088 m;东营组局部发育,岩性为砂岩和泥岩,厚度较小;明化镇组主要有河流相的砂、泥岩构成,底部发育砾岩,层厚 430 ~ 627 m;平原组发育砾石、粉砂、中砂和粘土,厚 214 ~ 296 m。

徐水凹陷内仅有龙 1 井钻遇前新生界,孔店组之

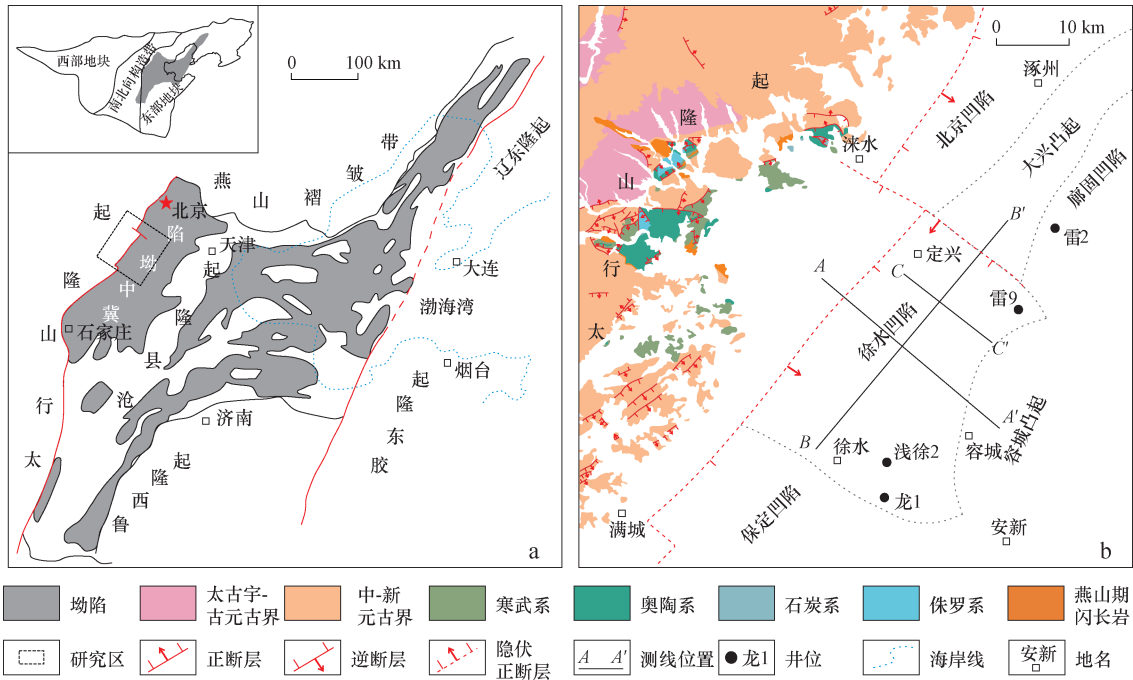


图 1 徐水凹陷构造位置(a)及冀中坳陷中部构造单元及地震测线位置(b)

Fig. 1 Structural location of Xushui Sag(a) and the structural units and locations of seismic profiles in central Jizhong Depression(b)

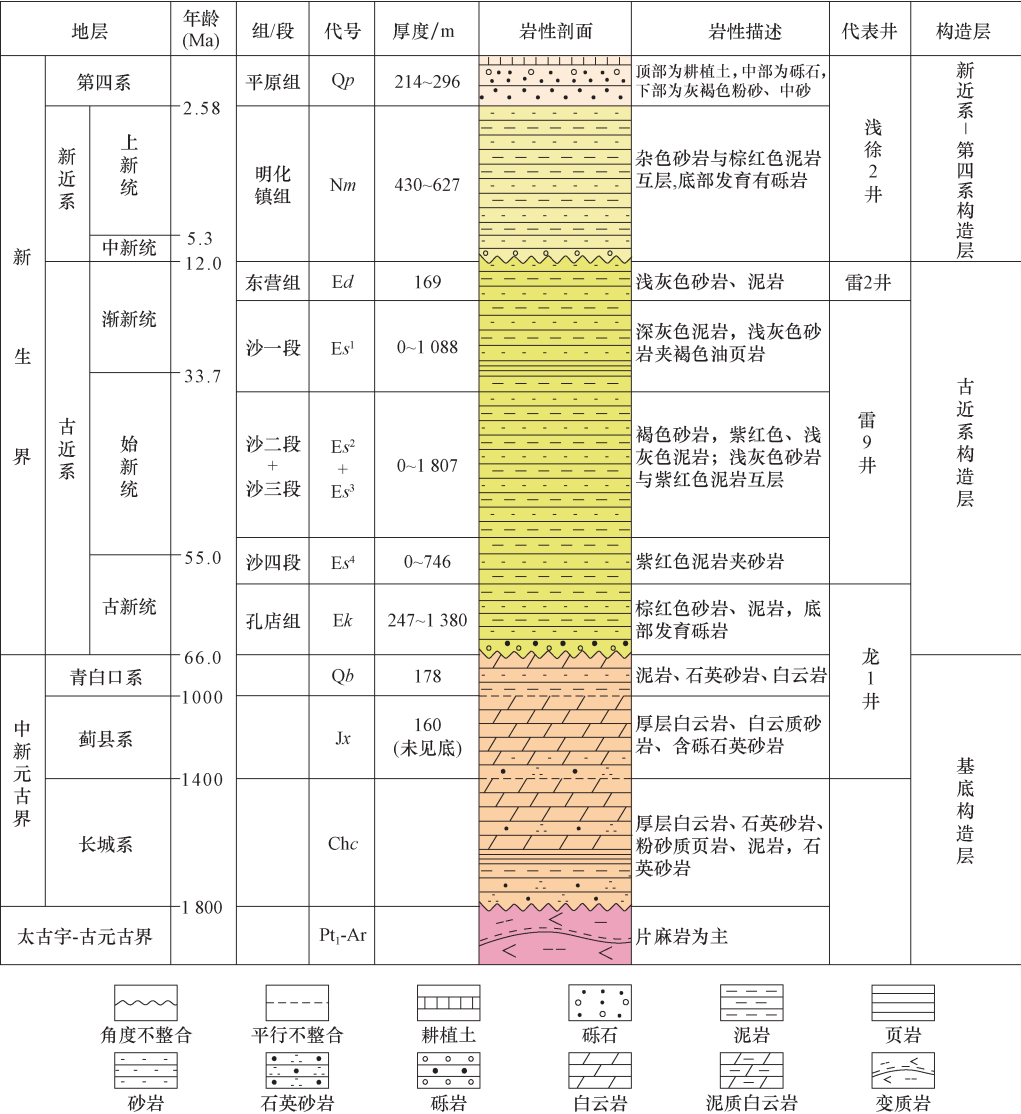


图 2 徐水凹陷地层综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of Xushui Sag

下为新元古界青白口系(图 3);而在冀中拗陷的其它地区,前新生界被大量钻井所揭示^[19-20];在研究区西侧的太行山隆起,前新生界(主要是中新元古界、太古宇-古元古界)也有着广泛的出露(图 1)。

2 地质结构

2.1 区域性不整合面

通过对研究区内的钻井和地震资料的系统解释,共识别出 2 个明显的区域性不整合面:古近系底部角度不整合面和新近系底部角度不整合面(图 3—图 5)。

古近系底部角度不整合面分隔了凹陷内断陷期地层与下伏中新元古界。在 NW-SE 向的地震剖面上可以观察到孔店组超覆于该不整合面之上,而下伏地

层遭受明显的剥蚀,二者之间为典型的角度不整合接触(图 4)。

新近系底部角度不整合面形成于渤海湾盆地断陷期与拗陷期之间,并在整个盆地内广泛分布^[21-22]。徐水凹陷内不同方向的地震剖面上均清晰地显示了该不整合面的发育(图 4,图 5)。不整合面附近,地层产状发生显著改变,下伏古近系遭受强烈剥蚀,并与上覆地层呈明显的角度相交(图 4,图 5)。

2.2 构造层划分

构造层通常是指一定构造单元里,某个特定的构造时期内形成的、具有共同构造变形特征的构造-地层组合^[23]。区域性的地层不整合面往往作为构造层之间的界线^[6]。

在前人研究的基础上^[19-20],根据识别出的区域性

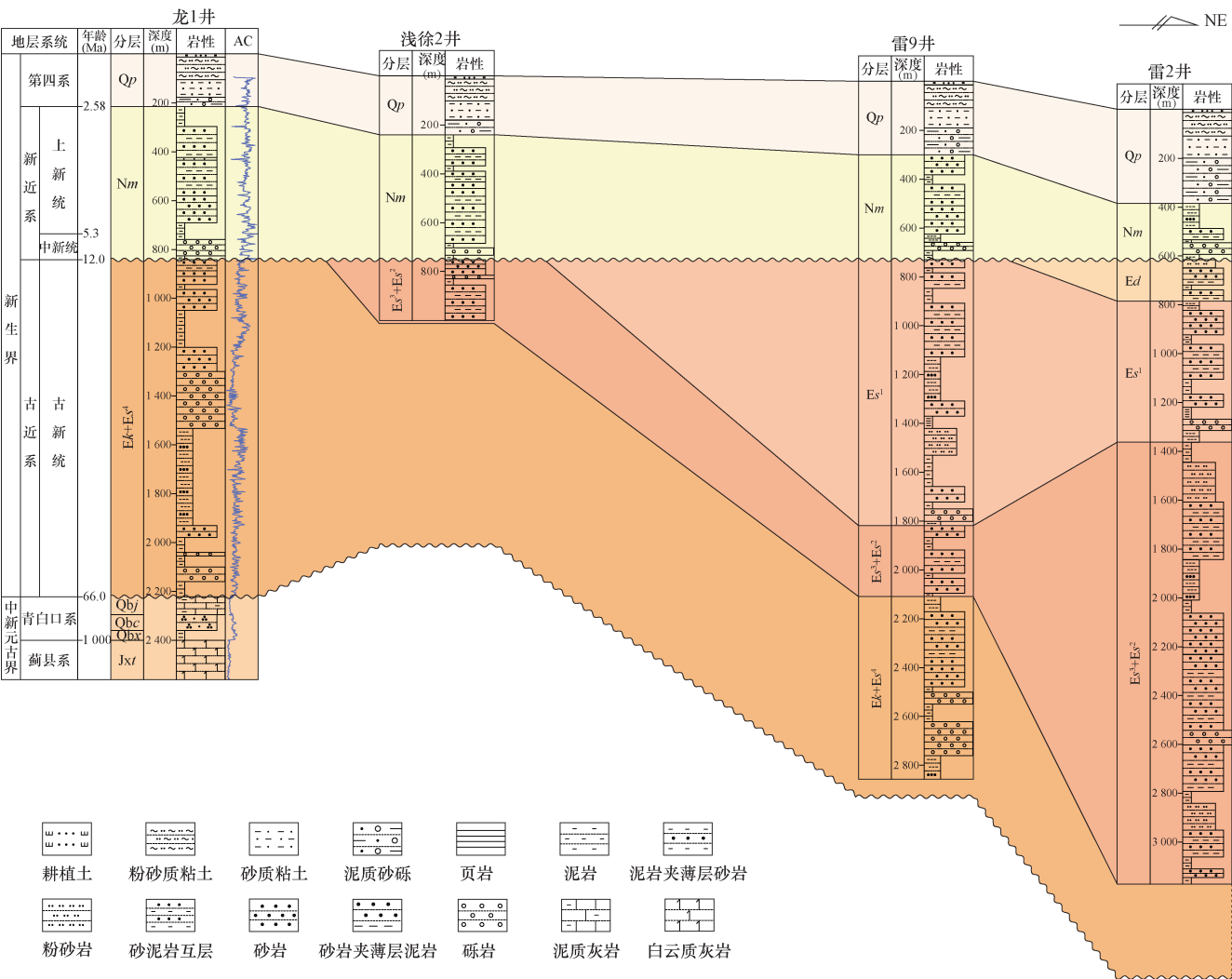


图 3 徐水凹陷 NE - SW 向连井剖面(井位见图 1b)

Fig. 3 NE-SW trending well-tie profile in the Xushui Sag(see Fig. 1b for the well location)

不整合面,在研究区内纵向上划分出 3 套构造层:基底构造层(太古宇 - 中新元古界)、古近系构造层、新近系 - 第四系构造层(图 2)。

基底构造层在研究区内广泛分布^[19-20]。其中,太古宇 - 古元古界岩性以片麻岩为主(图 2)。该套地层经历了中 - 新元古代以来长期、复杂的演化过程,研究区内古近纪的断陷活动对其现今的构造格局有着明显的控制作用;中新元古界(包括长城系、蓟县系和青白口系)作为冀中拗陷潜山领域勘探的重要目的层^[20],在研究区内遭受强烈的断层切割、改造作用,在凸起部位地层厚度明显减薄(图 4,图 5)。

古近系构造层包括孔店组、沙河街组和东营组,不同地层在研究区内的分布范围有着明显的区别(图 4,图 5)。在 NW - SE 向的地震剖面上,该构造层呈“碗状”,顶部遭受强烈剥蚀,内部断层相对不发育(图 4);NE - SW 向剖面则显示,该构造层自北向南显著减薄,

顶部同样遭受剥蚀,而内部发育多条不同倾向的次级断层(图 5)。

新近系 - 第四系构造层全区分布。与下伏地层相比,明化镇组和平原组地层产状发生了较大的变化,整体较为平缓且向东倾斜(图 4)。地层厚度自西向东逐渐增大,而南北向上则没有表现出明显的厚度变化(图 4,图 5)。该构造层内部基本上不发育次级断层(图 4,图 5)。

2.3 主要断裂特征

地震资料解释结果表明,研究区内最主要的断裂为太行山山前断层。该断层不仅是徐水凹陷的边界断层,还是整个渤海湾盆地与太行山隆起的分界^[12,24]。在该断层的控制下,徐水凹陷表现出西断东超的构造格局(图 4)。太行山山前断层在研究区内呈 NE 走向,断面倾向 SE,断层沿走向上延伸长度大于 40 km

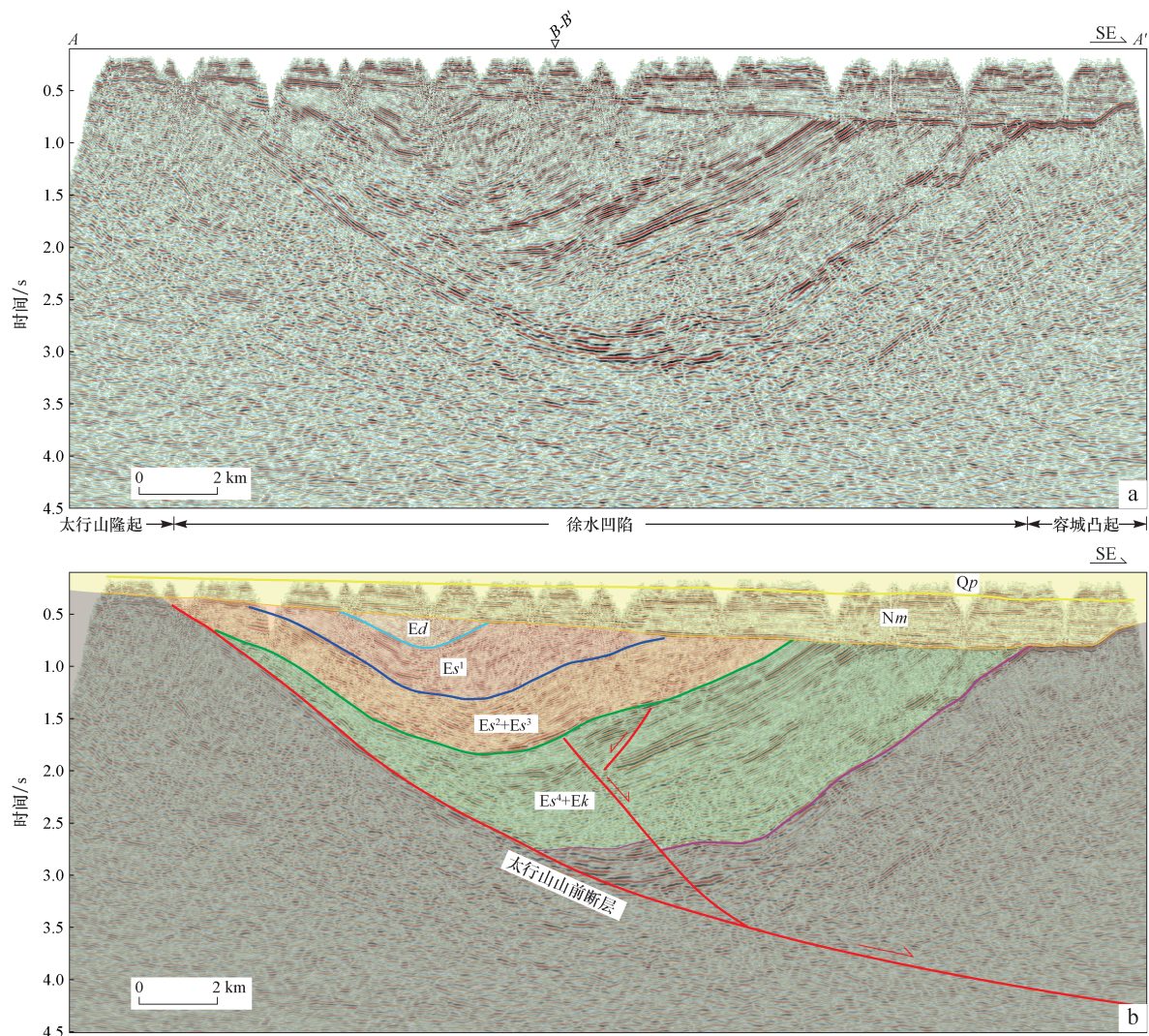


图4 过徐水凹陷的NW-SE向地震剖面(a)及解释结果(b)(剖面位置见图1b中AA')

Fig. 4 NW-SE trending seismic profile (a) in the Xushui Sag and its interpretation (b) (see Fig. 1b AA' for the profile location)

Qp. 第四系平原组; Nm. 新近系明化镇组; Ed. 古近系东营组; Es¹. 古近系沙一段; Es². 古近系沙二段; Es³. 古近系沙三段; Es⁴. 古近系沙四段; Ek. 古近系孔店组

(图1);在地震剖面上,断层上陡下缓,表现出典型的犁式断层特征(图4)。图4所示剖面未完全显示出断层面最终变平的位置,但在保定凹陷内,NW-SE向剖面揭示出断层滑脱面深度在5 500~6 500 ms^[19]。断层上盘同沉积地层的发育特征表明,研究区内的太行山山前断层于古近纪早期(孔店组-沙四段沉积时期)开始强烈活动,并控制地层沉积,同时,断层上盘内发育有规模较大的次级断层,导致孔店组-沙四段发生明显加厚(图4);而沙三段-东营组的发育受太行山山前断层的影响相对较小(图4)。

前人在研究整个太行山山前断层的分段性时,曾注意到 NWW 向发育的涞水断层^[24-25],但均未对其几何学和运动学特征进行分析。本次研究中,通过对研究区内 NE-SW 向地震剖面的解释,清晰地显示了涞

水断层的发育特征(图5)。与太行山山前断层类似,涞水断层在剖面上也表现为犁式断层,断层面滑脱深度大于5 500 ms。剖面显示,太行山山前断层的断面被涞水断层所切割,并随上盘地层一起发生变形(图5)。根据上盘同沉积地层发育特征,认为涞水断层强烈活动于沙三段-东营组沉积时期,并使徐水凹陷具有北断南超的特征。

3 构造演化

通过对古近系进行精细解释,在其内部识别出一系列地层超覆和剥蚀尖灭点(图6)。在综合这些信息和前人研究成果的基础上,采用编制平衡剖面的手段,恢复了徐水凹陷古近纪以来的构造演化过程(图7,

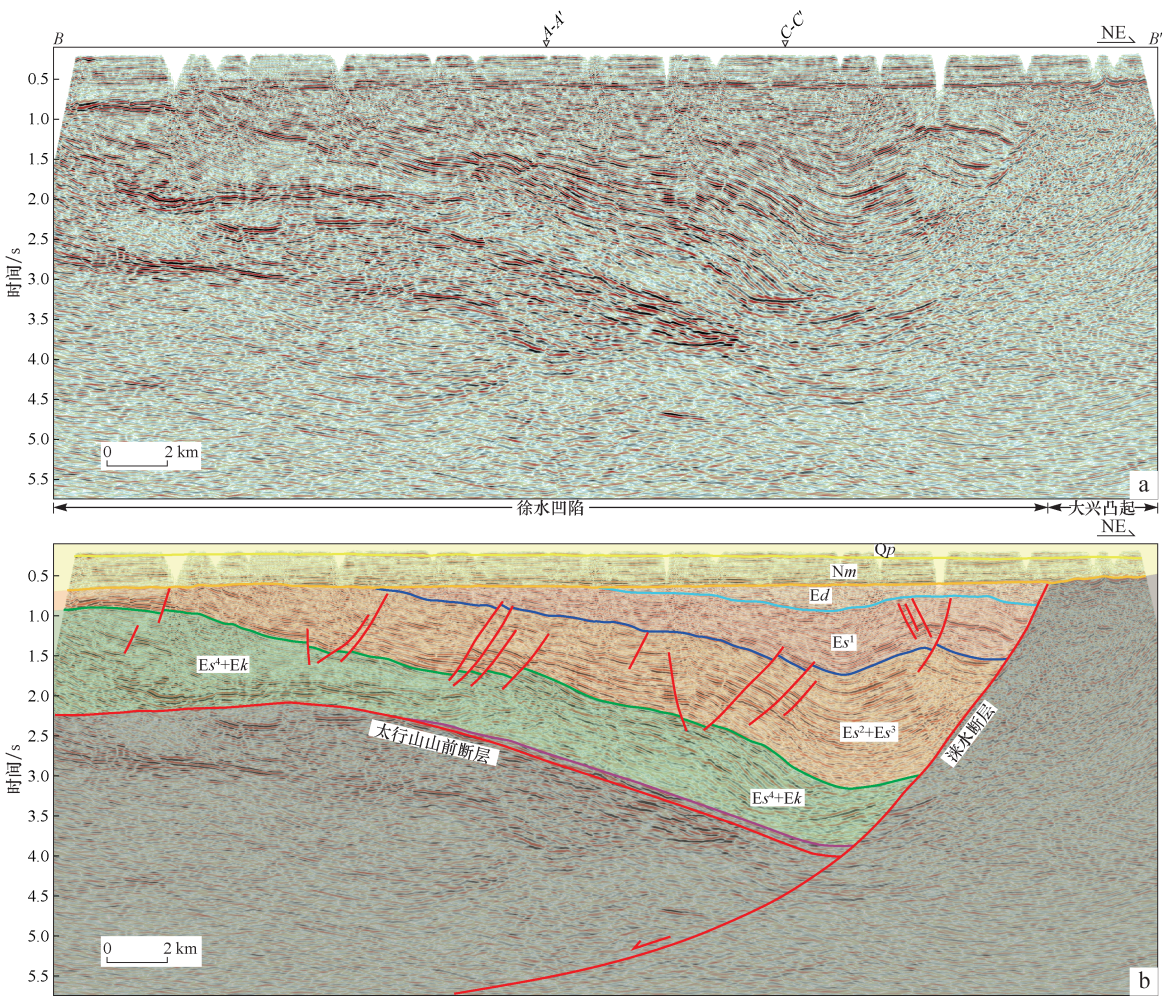


图 5 过徐水凹陷的 NE-SW 向地震剖面(a)及解释结果(b)(剖面位置见图 1b 中 BB')

ig. 5 NE-SW trending seismic profile(a)in the Xushui Sag and its interpretation(b) (see Fig. 1b BB' for the profile location)

Qp. 第四系平原组;Nm. 新近系明化镇组;Ed. 古近系东营组;Es¹. 古近系沙一段;Es². 古近系沙二段;Es³. 古近系沙三段;Es⁴. 古近系沙四段;Ek. 古近系孔店组

图 8),并将其分为 4 个阶段。

3.1 强烈断陷阶段(古新世—早始新世)

晚中生代,渤海湾盆地于华北克拉通东部岩石圈大规模减薄的背景下开始发育^[10,26-27],冀中拗陷也进入断陷阶段^[12,19,24]。古近纪是冀中拗陷发育的主要时期^[13-14]。古新世—早始新世,太行山山前断层强烈活动,徐水凹陷内沉积了厚度较大的孔店组—沙四段(图 4)。龙 1 井揭示该套地层残余厚度达 1 380 m。图 5 显示沿太行山山前断层走向方向上,孔店组—沙四段由 SW 向 NE 发生减薄,且在涞水断层上盘附近,该套地层没有发生加厚,表明这一时期涞水断层对徐水凹陷内的沉积过程没有明显的控制作用。

3.2 断陷持续发育阶段(早始新世—晚渐新世)

沙四段沉积之后,研究区内断陷活动持续发育。

前人研究成果表明,渤海湾盆地内古近纪断陷活动具有明显的幕式特征^[17-18,22]。研究区古近系内部发育的一系列地层超覆和尖灭现象(图 6)也表明了这一特征。

NW-SE 向地震剖面显示,太行山山前断层上盘沙三段—东营组厚度向断层方向逐渐减薄(图 4,图 7);而 NE-SW 向地震剖面及相应的演化剖面则显示,该套地层厚度由南向北显著加厚(图 5,图 8)。这些现象表明,在这一阶段(沙三段—东营组沉积时期),涞水断层的活动对徐水凹陷的发育起主要的控制作用。此外,通过分析 NW-SE 方向上沙三段—东营组的厚度变化规律可以发现,沉积中心具有向 NW 方向迁移的特征(图 4,图 7),这一现象暗示了涞水断层的活动逐渐向 NW 方向迁移。

3.3 断—拗过渡阶段(渐新世末—早中新世)

大量研究表明,古近系东营组沉积末期,区域性的

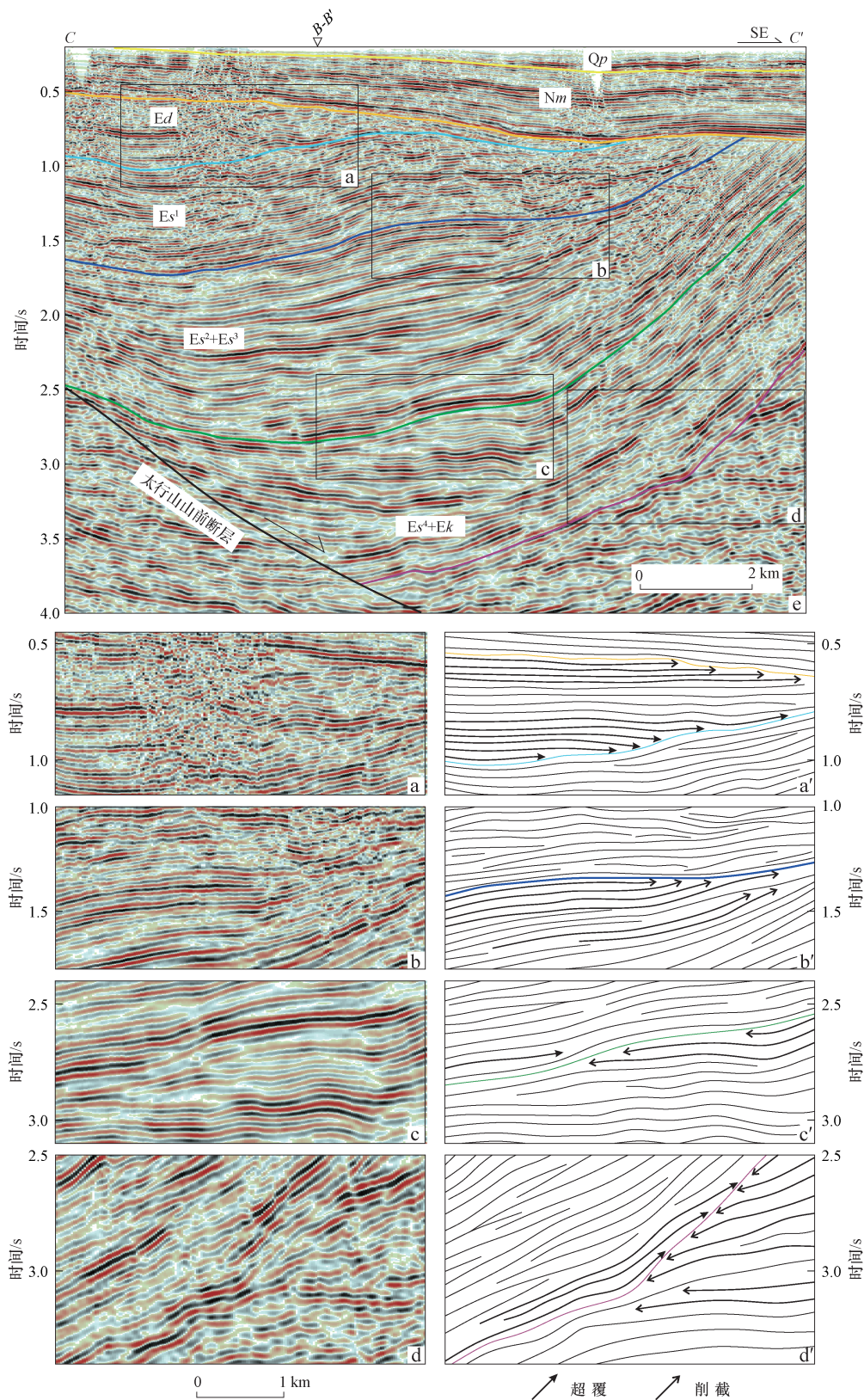


图 6 徐水凹陷古近系内部地层超覆和剥蚀尖灭现象(剖面位置见图 1b 中 CC')

Fig. 6 Stratigraphic overlapping, denudation and pinch-out within the Paleogene sequences in the Xushui Sag(see Fig. 1b CC' for the profile location)

a—e. 地震剖面; a'—d'. 解释结果

Qp. 第四系平原组; Nm. 新近系明化镇组; Ed. 古近系东营组; Es¹. 古近系沙一段; Es². 古近系沙二段; Es³. 古近系沙三段; Es⁴. 古近系沙四段; Ek. 古近系孔店组

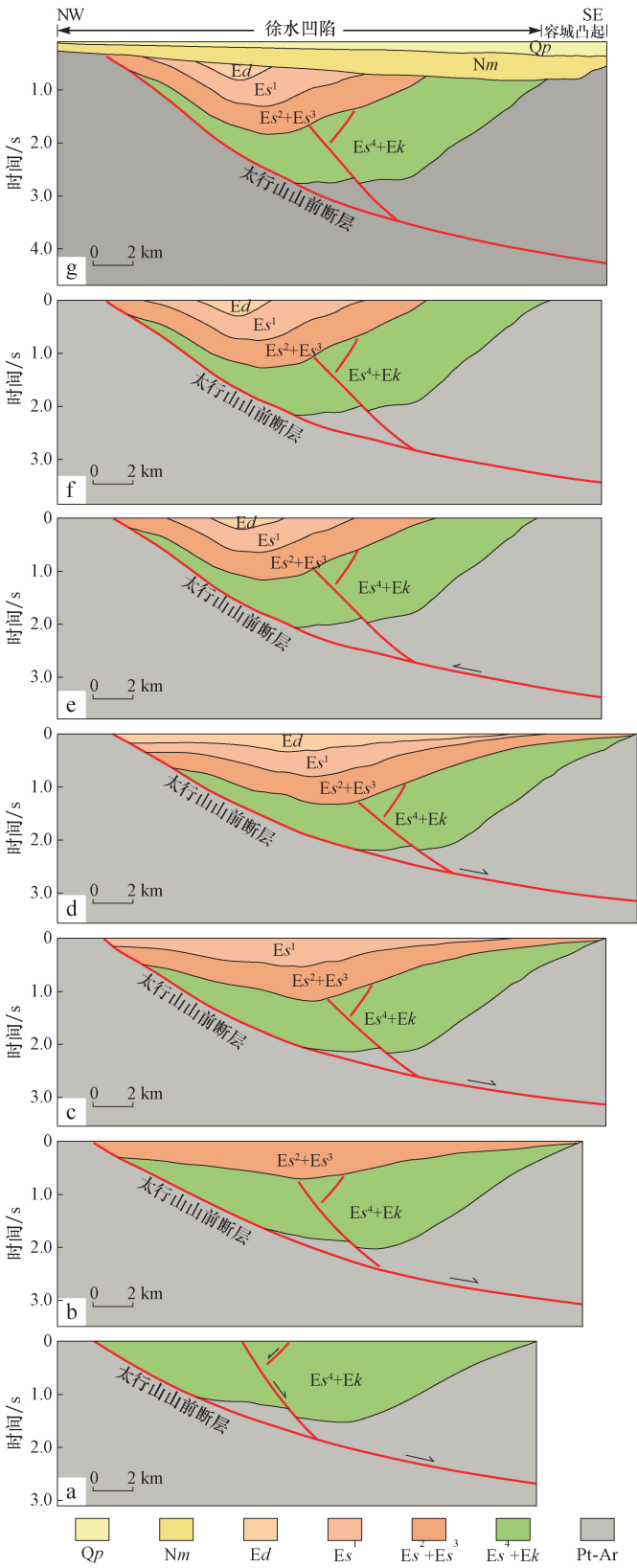


图 7 徐水凹陷 NW - SE 向构造演化剖面(剖面位置见图 1b 中 AA')

Fig. 7 NW-SE trending tectonic evolution section in the Xushui Sag(see Fig. 1b AA' for the section location)

a. 孔店组 - 沙四段沉积时期; b. 沙三段 - 沙二段沉积时期; c. 沙一段沉积时期; d. 东营组沉积时期; e. 反转期; f. 明化镇组沉积之前; g. 现今剖面
Qp. 第四系平原组; Nm. 新近系明化镇组; Ed. 古近系东营组; Es¹. 古近系沙一段; Es². 古近系沙二段;
Es³. 古近系沙三段; Es⁴. 古近系沙四段; Ek. 古近系孔店组

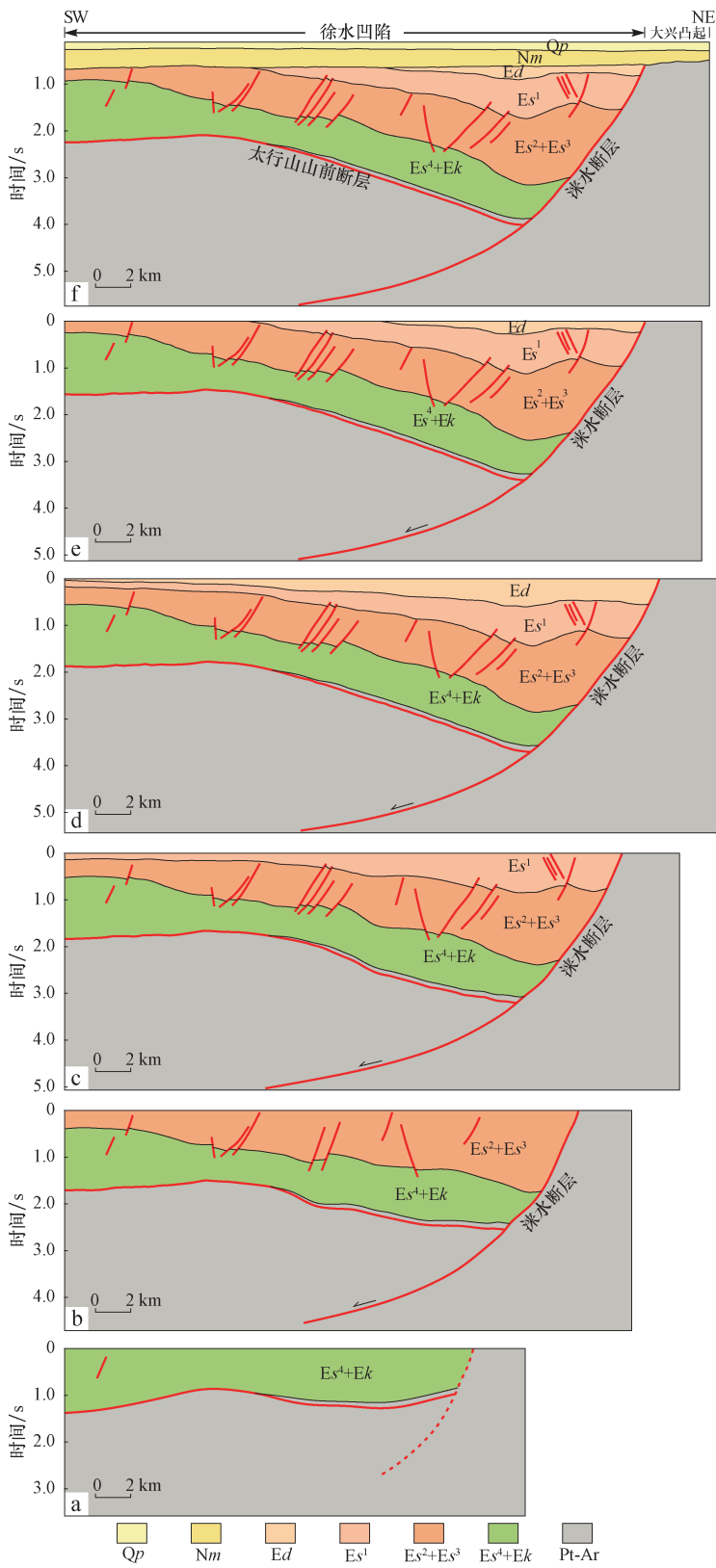


图 8 徐水凹陷 NE-SW 向构造演化剖面(剖面位置见图 1b 中 BB')

Fig. 8 NE-SW trending tectonic evolution section in the Xushui Sag(see Fig. 1b BB' for the section location)

a. 孔店组-沙四段沉积时期;b. 沙三段-沙二段沉积时期;c. 沙一段沉积时期;d. 东营组沉积时期;e. 明化镇组沉积之前;f. 现今剖面
Qp. 第四系平原组;Nm. 新近系明化镇组;Ed. 古近系东营组;Es¹. 古近系沙一段;Es². 古近系沙二段;Es³. 古近系沙三段;Es⁴. 古近系沙四段;
Ek. 古近系孔店组

挤压使得断陷期地层遭受不同程度的剥蚀^[17],并产生了新近系底部的区域性角度不整合(图7)。该不整合面的出现,标志着徐水凹陷的构造演化由断陷阶段进入拗陷阶段。本次研究中,将这一时期称为断-拗过渡阶段。与邻区相比^[19,28],徐水凹陷内缺失新近系下部馆陶组,表明研究区内这一时期所遭受的挤压作用可能较为强烈。

3.4 拗陷阶段(晚中新世—第四纪)

晚中新世—第四纪(相当于明化镇组—平原组沉积时期),徐水凹陷内的断陷活动显著减弱,不同方向的地震剖面上均显示这一时期基本上不发育次级断层,区内主要发生热沉降,地层产状平缓(图4,图5)。也有研究表明,太行山山前断层于第四纪期间发生过活动^[3]。

4 徐水凹陷构造演化控制因素

综合分析地震解释和剖面复原结果发现,徐水凹陷的构造演化受控于不同方向上断层的差异性活动。古近纪早期,太行山山前断层强烈活动,徐水凹陷表现为典型的半地堑,具有西断东超的结构,断层活动对孔店组—沙四段的沉积有着明显的控制作用(图7);沙三段—东营组沉积时期,地层厚度变化主要表现在NE—SW方向上,反映了涑水断层的强烈活动,此时徐水凹陷表现为北断南超的半地堑(图5)。同时,凹陷南部的地层因掀斜抬升而遭受剥蚀(图5,图8),NW—SE向的地震剖面因大致平行于涑水断层而表现出“碗状”结构。

因此,认为在强烈断陷阶段,太行山山前断层的活动控制了徐水凹陷的发育,而在随后的断陷持续发育阶段,太行山山前断层的控制作用减弱,涑水断层的活动主导了徐水凹陷的发展。两条断层的共同作用,使得徐水凹陷表现出早期西断东超,晚期北断南超的构造格局。

在断-拗过渡阶段,太行山山前断层发生一定程度的正反转,导致早期沉积地层遭受剥蚀,而在这一阶段涑水断层基本上不发生活动。晚中新世以来的拗陷阶段,两条断层均没有明显活动,研究区以发生热沉降为主。

5 结论

1) 徐水凹陷新生界内共发育古近系底部和新近

系底部2个区域性不整合面,在纵向上划分出3套构造层:基底构造层、古近系构造层和新近系—第四系构造层。

2) 区内发育的主要断层包括NE向的太行山山前断层和NNW向的涑水断层,二者共同作用使得徐水凹陷表现出西断东超、北断南超的构造格局。

3) 徐水凹陷是在太行山山前断层面上盘发育的新生代断陷盆地,其经历的演化过程可以分为4个阶段:强烈断陷阶段、断陷持续发育阶段、断-拗过渡阶段和拗陷阶段。徐水凹陷的构造演化受控于不同方向上断层的差异性活动。

参考文献

- [1] 何登发,崔永谦,单帅强,等.渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的三维地质结构特征[J].地质科学,2018,53(1):1-24.
He Dengfa, Cui Yongqian, Shan Shuaiqiang, et al. Characteristics of geologic framework of buried-hill in Jizhong depression, Bohai Bay Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2018, 53(1): 1-24.
- [2] 刘桂梅,夏训银,王身龙,等.浅层地震勘探在保定市隐伏活动断层探测中的应用[J].勘察科学技术,2014,(3):58-61.
Liu Guimei, Xia Xunyun, Wang Shenlong, et al. Application of shallow seismic exploration for buried active faults in Baoding City[J]. Site Investigation Science and Technology, 2014, (3): 58-61.
- [3] 高战武,吴昊,李光涛,等.太行山山前断裂带中北段晚第四纪活动性研究[J].震灾防御技术,2014,9(2):159-170.
Gao Zhanwu, Wu Hao, Li Guangtao, et al. Late Quaternary activity of the central-north segment of Taihang Mountain piedmont fault zone [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(2): 159-170.
- [4] 于长春,乔日新,张迪硕.雄安新区航磁推断的三维基底构造特征[J].物探与化探,2017,41(3):385-391.
Yu Changchun, Qiao Rixin, Zhang Dishuo. The basement tectonic characteristics from interpretation of aeromagnetic data in Xiong'an region[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(3): 385-391.
- [5] 张善文,隋凤贵,林会喜,等.渤海湾盆地前古近系油气地质与远景评价[M].北京:地质出版社,2009:78-97.
Zhang Shanwen, Sui Fengui, Lin Huixi, et al. Petroleum geology and perspective evaluation on Pre-Paleogene System in Bohai Bay Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 78-97.
- [6] 林玉祥,赵承锦,朱传真,等.济阳坳陷惠民凹陷新生代沉积—沉降中心迁移规律及其机制[J].石油与天然气地质,2016,37(4):509-519.
Lin Yuxiang, Zhao Chengjin, Zhu Chuanchen, et al. Migration pattern and geodynamic mechanism of Cenozoic depocenter and subsidence center in Huimin Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 509-519.
- [7] 胡阳,吴智平,钟志洪,等.珠江口盆地珠一坳陷始新世中—晚期构造变革特征及成因[J].石油与天然气地质,2016,37(5):779-785.

- Hu Yang, Wu Zhiping, Zhong Zhihong, et al. Characterization and genesis of the Middle and Late Eocene tectonic changes in Zhu 1 Depression of Peral River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 779–785.
- [8] 庞小军,王清斌,代黎明,等. 渤海海域北部秦南凹陷东南缘古近系断层活动及其对沉积的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1059–1067.
- Pang Xiaojun, Wang Qingbin, Dai Liming, et al. Paleogene fault activities and their control over sedimentation at southeastern margin of Qinnan Sag, northern Bohai Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1059–1067.
- [9] Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 2005, 136(2): 177–202.
- [10] 李三忠,索艳慧,戴黎明,等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. *地质前缘*, 2010, 17(4): 64–89.
- Li Sanzhong, Suo Yanhui, Dai Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 64–89.
- [11] 孙冬胜. 冀中坳陷中区中生代复合伸展构造[D]. 西安: 西北大学, 2001.
- Sun Dongsheng. Meso-Cenozoic complex extensional structures in the middle area of Jizhong Depression of Bohaiwan Basin, China[D]. Xi'an: Northwest University, 2001.
- [12] 徐杰,高战武,孙建宝,等. 区域伸展体制下盆山构造耦合关系的探讨—以渤海湾盆地和太行山为例[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 165–174.
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Sun Jianbao, et al. A preliminary study of the coupling relationship between basin and mountain in extensional environments—a case study of the Bohai Bay Basin and Taihang Mountain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 165–174.
- [13] 杨明慧,刘池阳,杨斌谊,等. 冀中坳陷古近纪的伸展构造[J]. *地质论评*, 2002a, 48(1): 58–67.
- Yang Minghui, Liu Chiyang, Yang Binyi, et al. Extensional structures of the Paleogene in the central Hebei Basin, China[J]. *Geological Review*, 2002a, 48(1): 58–67.
- [14] 杨明慧,刘池阳,孙冬胜,等. 冀中坳陷的伸展构造系统及其构造背景[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(2): 113–120.
- Yang Minghui, Liu Chiyang, Sun Dongsheng, et al. Extensional tectonic system and its deep-seated setting of Jizhong basin, China[J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 2002, 26(2): 113–120.
- [15] 孙冬胜,刘池阳,杨明慧,等. 渤海湾盆地冀中坳陷中区中生代复合伸展构造[J]. *地质论评*, 2004, 50(5): 484–491.
- Sun Dongsheng, Liu Chiyang, Yang Minghui, et al. Study on complex extensional structures in the Middle Jizhong Depression in the Bohai Bay Basin[J]. *Geological Review*, 2004, 50(5): 484–491.
- [16] 李德生. 渤海湾含油气盆地的地质和构造特征[J]. *石油学报*, 1980, 1(1): 8–22.
- Li Desheng. Geology and structural characteristics of Bohai gulf oil and gas basin, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1980, 1(1): 8–22.
- [17] Allen M B, Macdonald D I M, Zhao Xun, et al. Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(7): 951–972.
- [18] 漆家福,张一伟,陆克政,等. 渤海湾盆地新生代构造演化[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1995, (增刊): 1–6.
- Qi Jiafu, Zhang Yiwei, Lu Kezheng, et al. Cenozoic tectonic evolution in Bohai Bay Basin province[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1995, 19(S): 1–6.
- [19] 何登发,崔永谦,张煜颖,等. 渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的构造成因类型[J]. *岩石学报*, 2017, 33(4): 1338–1356.
- He Dengfa, Cui Yongqian, Zhang Yuying, et al. Structural genetic types of paleo-buried hill in Jizhong depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4): 1338–1356.
- [20] Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Wang Quan, et al. Buried-hill play, Jizhong subbasin, Bohai Bay basin: A review and future prospectivity[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(1): 1–26.
- [21] 马杏垣,刘和甫,王维襄,等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. *地质学报*, 1983, 57(1): 22–32.
- Ma Xingyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, et al. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1983, 57(1): 22–32.
- [22] Qi Jiafu, Yang Qiao. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(4): 757–771.
- [23] 万天丰. 中国大地构造学[M]. 北京:地质出版社, 2011: 4–5.
- Wan Tianfeng. The tectonics of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 4–5.
- [24] 徐杰,高战武,宋长青,等. 太行山山前断裂带的构造特征[J]. *地震地质*, 2000, 22(2): 111–122.
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Song Changqing, et al. The structural characters of the piedmont fault zone of Taihang mountain[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(2): 111–122.
- [25] 刘锡大,赵希俊,侯建军,等. 太行山山前断裂带的分形几何特征[J]. *地震研究*, 1998, 21(2): 165–171.
- Liu Xida, Zhao Xijun, Hou Jianjun, et al. Fractal geometry in the Taihangshan piedmont seismotectonic zone[J]. *Journal of Seismological Research*, 1998, 21(2): 165–171.
- [26] Chen Ling. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications[J]. *Lithos*, 2010, (120): 96–115.
- [27] 朱日祥,陈凌,吴福元,等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(5): 583–592.
- Zhu Rixiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 41(5): 583–592.
- [28] 桂宝玲,何登发,闫福旺,等. 廊固凹陷的三维精细地质结构[J]. *地质科学*, 2011, 46(3): 1–10.
- Gui Baoling, He Dengfa, Yan Fawang, et al. 3D fine geological structure of Langfang-gu'an fault-sag in Bohaiwan Basin, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2011, 46(3): 1–10.