雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束

何登发^{1*}, 单帅强¹, 张煜颖¹, 鲁人齐², 张锐锋³, 崔永谦³

1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083;

2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;

3. 中国石油华北油田分公司, 任丘 062552

* E-mail: hedengfa282@263.net

收稿日期: 2017-10-16; 收修改稿日期: 2018-01-29; 接受日期: 2018-02-27; 网络版发表日期: 2018-05-02

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0601405)和国家自然科学基金项目(批准号: 41430316)资助

摘要 研究雄安新区的地质结构, 将为地壳稳定性评估、城市规划和基础工程建设, 探讨油气、地热、干热岩等能源、资源的赋存规律奠定重要基础. 本文综合利用最新的高精度地震和深钻井资料, 建立了雄安新区的地层系统; 运用构造解析方法, 精细刻画了研究区的断裂系统; 应用平衡地质剖面技术, 重建了研究区新生代以来的构造演化过程; 根据次级断层发育特征和区域上活动地震的分布规律, 探讨了雄安新区的构造活动性. 研究表明, 雄安新区地处冀中拗陷北部与中部的过渡、转换部位, 发育3个区域性不整合面, 据此在纵向上划分出4个构造层; 受太行山山前断层、大兴断层、容城断层和牛东断层的共同作用, 该区具有凸起和凹陷相间发育的构造格局, 该构造格局和断裂分布特征对区内油气和地热资源的储集条件和富集规律有着重要的控制作用; 它的断陷过程始于古近纪早期, 并表现出明显的幕式特征, 伸展量和伸展率均逐渐减小; 次级断层发育特征和区域地震分布规律表明, 雄安新区新近纪以来处于相对稳定的构造位置, 而其以东的霸县凹陷等地区则具有明显的构造活动性.

关键词 地质结构, 构造-地层层序, 断裂系统, 地壳稳定性, 雄安新区

1 前言

地质结构是岩石圈长期、复杂建造与改造过程的最终体现, 是地球内、外动力综合作用的结果. 盆地的地质结构通常为由区域不整合面所限定的构造层和被断裂(带)切割的断块(断裂系统)构成(童晓光等, 1992; 贾承造, 1997), 具有垂向分层、横向分块的地质特征(何登发等, 2017a). 盆地的地质结构是认识盆地形

成、演化及相关资源、能源赋存与地壳稳定性的重要窗口(童晓光等, 1992).

雄安新区处于渤海湾盆地冀中拗陷的中部, 研究其地质结构具有重要意义. 首先, 地质结构是评估地壳稳定性的基础, 已有研究表明地面沉降和地裂缝为雄安新区主要的地质灾害(张万益等, 2017), 而这类地质灾害的发生与其深部地质结构有着密切的关系(彭建兵等, 2007), 其发育程度影响城市规划和基础工程

中文引用格式: 何登发, 单帅强, 张煜颖, 鲁人齐, 张锐锋, 崔永谦. 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束. 中国科学: 地球科学, 48: 1207–1222, doi: [10.1360/N072017-00345](https://doi.org/10.1360/N072017-00345)

英文引用格式: He D F, Shan S Q, Zhang Y Y, Lu R Q, Zhang R F, Cui Y Q. 2018. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data. Science China Earth Sciences, 61: 1007–1022, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9188-4>

建设; 其次, 地壳结构是控制资源、能源富集的关键, 不仅是决定油气聚集的根本因素(李德生, 1982; 贾承造, 1997; 何登发等, 2006), 也对该地区地热、干热岩资源的分布有着重要的影响(李卫卫等, 2014). 自雄安新区设立以来, 积极开展了相关的地质调查工作, 在水文、浅层地热开发方面取得了显著进展(张万益等, 2017), 浅部的水文地质监测井和工程地质勘察钻孔资料显示, 雄安新区地下水质量总体良好、浅层地热能开发利用条件适宜、全区适合工程建设. 此外, 利用航磁对雄安新区基底构造的研究, 初步揭示了该区基底起伏特征及断裂带发育位置(于长春等, 2017). 目前的研究主要集中于浅部和深部两个层次, 而对上地壳尺度的研究还相对缺乏; 在资料基础和研究方法上, 也未能充分利用深井和反射地震剖面等高精度的资料对雄安新区的地质结构开展系统的分析.

雄安新区所在的冀中坳陷为中石油华北油田分公司探区, 半个多世纪的油气勘探积累了丰富的基础地质与地球物理资料, 为研究其地质结构奠定了良好的基础. 本文利用最新的高精度地震和深钻井资料, 并结合区域与深部地质资料, 对雄安新区的地质结构进行研究. 在建立研究区地层系统的基础上, 根据识别出的区域不整合面, 划分了构造-地层层序; 通过刻画主要断裂的平面展布与三维结构, 揭示了雄安新区的断裂系统特征; 在编制平衡地质剖面与构造解析的基础上, 复原了雄安新区地质结构的形成与演化过程; 剖析了地壳的稳定性.

2 区域地质背景

2.1 大地构造位置及构造演化

雄安新区处于渤海湾盆地冀中坳陷的中部(图1a、b), 在构造单元组成上包括容城凸起、牛驼镇凸起南部、牛北斜坡南部和白洋淀-大河镇洼槽, 具有“两凸夹一洼”的特征(图1c). 其周围分别与保定、徐水、廊固、霸县、饶阳等凹陷相接, 整体上位于冀中坳陷北部与中部的构造过渡与转换部位(孙冬胜, 2001; 杨明慧等, 2002a、b). 这在冀中坳陷莫霍面埋深变化上有着清晰的反映(图1a). 雄安新区及其北部莫霍面埋深约为32km, 表现为莫霍面隆起, 地理位置上大体对应于廊固和霸县凹陷; 而在冀中坳陷的南部, 莫霍面埋深普遍在34~35km. 雄安新区南、北两侧在地

壳厚度上有明显差异.

作为渤海湾盆地的一部分, 雄安新区在大地构造位置上处于华北克拉通的东部陆块上(图1a)(Zhao 等, 2005; 李三忠等, 2010). 太古宙-古元古代为克拉通结晶基底形成阶段(Zhao 等, 2001, 2005; Kusky 等, 2003; Santosh, 2010; 翟明国, 2010). 随后, 华北克拉通进入稳定的盖层演化阶段(吴福元等, 2008), 中元古代华北克拉通经历陆内裂谷作用(彭澎等, 2002; 翟明国, 2010), 并相应地沉积了较厚的地层; 新元古代-古生代, 构造活动以整体性的升降运动为主(王鸿祯, 1985; 翟明国, 2010; 葛肖虹等, 2014). 晚古生代华北克拉通北部古亚洲洋的南向俯冲以及早中生代华南与华北的碰撞, 均对华北克拉通的发展、演化产生了重要的影响(朱日祥等, 2011, 2012). 印支运动中, 近南北向的挤压造成渤海湾盆地近东西向的构造格局(于福生等, 2002; 漆家福等, 2003). 燕山运动早期的挤压事件使得渤海湾盆地内发育一系列北北东向的逆冲构造(刘池洋, 1986; 翟明国等, 2004; Cao 等, 2015), 冀中坳陷西部(包括雄安新区)因处于较高的构造部位, 导致地层遭受大量剥蚀(孙冬胜等, 2004; 杨明慧等, 2002a, 2002b). 晚中生代, 蒙古-鄂霍次克洋的关闭和古太平洋板块的俯冲作用使得华北克拉通的构造体制发生显著改变, 由近南北向的收缩变为北西西-南东东向的伸展(翟明国等, 2003, 2004; 朱日祥等, 2011). 在此背景下, 华北克拉通东部岩石圈发生大规模减薄(吴福元等, 2008; Chen, 2010; 朱日祥等, 2011, 2012). 与此同时, 渤海湾盆地开始发育(李三忠等, 2010). 研究区在太行山前断层和一系列次级断层的控制下, 发生强烈的伸展块断活动, 这一过程持续至古近纪末期(李德生, 1980, 1982; Allen 等, 1997; 孙冬胜, 2001; 杨明慧等, 2002a, 2002b). 新近纪-第四纪, 雄安新区连同整个渤海湾盆地进入裂后热沉降阶段(马杏垣等, 1983; 漆家福等, 1995; Allen 等, 1997). 新生代期间, 华北克拉通东部属于环太平洋构造域的一部分(翟明国等, 2010).

2.2 地层系统

冀中坳陷内长期的油气勘探工作积累了丰富的钻井和地震资料, 为认识研究区的地层系统提供了良好的基础. 一些学者对坳陷内前新生代地层进行了详细的划分与对比(李德生, 1980; Zha, 1984; Zhao 等, 2015), 在相邻的廊固、保定等凹陷内也开展了相应工

图 1 雄安新区的大地构造位置图

(a) 渤海湾盆地的大地构造位置及其内部构造单元分布, 等值线表示莫霍面埋深(据He 等, 2003); (b) 雄安新区在冀中坳陷内所处的构造位置; (c) 本次研究中用到的地震测线和深钻井位置, 以及区内油田分布(据华北油田内部资料修改)。① 岔河集油田; ② 高家堡油田; ③ 郑州油田; ④ 文安油田

作(桂宝玲等, 2011; 单帅强等, 2016)。在此基础上, 利用最新的钻井和地震资料, 建立了雄安新区的地层综合柱状图(图2), 并结合连井剖面(图3、4), 分析研究区

内地层发育特征。

雄安新区地层系统自下至上依次包括太古宇、古元古界、中元古界(长城系和蓟县系)、古近系(孔店

图 2 雄安新区地层综合柱状图

组、沙河街组、东营组)、新近系(馆陶组和明化镇组)和第四系(平原组)。其中太古宇-古元古界为深变质岩,在研究区内埋深变化较大,于凸起部位埋深较浅(图5)。长城系底部为滨岸相沉积,顶部为局限台地环境下发育的碳酸盐岩(王鸿祯, 1985),邻区保定凹陷内钻井揭示长城系厚度大于1750m(单帅强等, 2016)。蓟县系底部为白云质砂岩,顶部为雾迷山组巨厚的白云岩,该套地层是冀中坳陷内潜山油气勘探的主要目的层系,研究区内在牛驼镇凸起上有钻井揭示(图3),厚度在126.5~210m之间。研究区内古近系主要分布在白洋淀洼槽内,在容城凸起和牛驼镇凸起上剥蚀较为严重(图3~5)。其中,孔店组岩性以泥岩和砂岩为主,底部发育砾岩,厚0~1156m;沙四段主要为泥岩,夹有薄层砂岩,层厚0~869.5m;沙三段-沙二段为滨浅湖、河流相沉积,主要发育砂泥岩互层,厚度变化范围为0~1248m;沙一段以浅湖相泥岩、页岩和砂岩为主,厚度为

0~591m;东营组主要为滨浅湖、河流相的砂岩和泥岩,厚度变化范围较大,在0~1233m。新近系以河流相砂、泥岩沉积为主,馆陶组厚0~424.5m,明化镇组厚度为686~947m。第四系底部为粉砂、中砂,上部发育砂质黏土,层厚348~437m。

3 地层不整合面与构造层

构造层是指在一定的构造单元里、某个构造时期内形成的、具有相同构造变形特征的地层-构造组合(汪泽成, 2002; 万天丰, 2011)。不同构造层之间往往以区域性地层不整合面为界(张善文等, 2009)。

3.1 区域不整合面

根据对雄安新区钻井和地震资料的解释结果,在过研究区的地震反射剖面上清楚地识别出了2个区域

图 3 雄安新区NE-SW向连井剖面
井位见图1(c). 深度单位为m

图 4 雄安新区近NW-SE向连井剖面
井位见图1(c), 岩性符号见图3. 深度单位为m

性不整合面: 古近系底界面和新近系底界面(图5~7). 动发育初期. 地震资料解释结果显示, 该不整合面分布于整个研究区内. 在过白洋淀洼槽至牛驼镇凸起的地

图5 过雄安新区NW-SE向地震剖面解释结果及年代地层格架剖面
剖面位置见图1(c) A-A'

震剖面上, 可以清晰地看到古近系超覆于下伏蓟县系之上, 二者之间呈角度不整合接触(图5)。在相邻的霸县、徐水、饶阳等凹陷内, 同样可以观察到典型的上超现象(图5、6)。在该不整合面附近, 地层产状有着显著变化, “下削上超”现象较为发育(图5)。

新近系底部角度不整合面是渤海湾盆地断拗过渡期的产物, 在整个渤海湾盆地内广泛分布(马杏垣等, 1983; Qi 等, 2010; 葛肖虹等, 2014)。研究区内, 馆陶组不整合于下伏不同时期的地层之上(图5、7)。由凸起到洼槽内, 下伏地层遭受不同程度的剥蚀, 在牛驼镇凸起上甚至表现为明化镇组直接覆盖于蓟县系之上(图3、4)。该不整合面上、下地层产状也发生明显改

变, 同样可见“下削上超”现象(图5、7)。

此外, 前人研究表明, 中元古界长城系底部与下伏结晶基底之间亦为不整合接触(葛肖虹等, 2014), 该不整合面在蓟县地区有着良好的出露。研究区内由于埋深较大, 该不整合面在地震剖面上的特征不明显。

3.2 构造层划分

根据识别出的区域性不整合面, 并结合前人的研究成果, 在雄安新区划分出4套构造层: 古元古界-太古宇构造层、中元古界构造层、古近系构造层和第四系-新近系构造层(图5~7)。

古元古界-太古宇构造层在研究区内全部分布(图

图6 过雄安新区NE-SW向地震剖面解释结果及年代地层格架剖面
剖面位置见图1(c) B-B'

5~7), 岩性以片麻岩和斜长角闪岩为主。该构造层经历了中-新元古代以来的长期、复杂的构造演化, 其现今构造格局的形成主要受控于晚中生代-古近纪的断层活动(图5、7), 其内部也发育有一系列规模不等的褶皱(图5, 图6)。

中元古界构造层主要包括长城系和蓟县系(图2),

该套地层底部发育有石英砂岩和白云质砂岩, 向上逐渐过渡为大套白云岩。研究区内该构造层厚度变化较大, 在凸起部位由于遭受强烈剥蚀而明显减薄(图5、6)。构造层被多条大型断层切穿(图5、7), 断层活动对地层产生强烈改造, 并造成地层的局部缺失(图5、7)。

古近系构造层在地层上包括古近纪断陷期发育的

图 7 过雄安新区NE-SW向地震剖面解释结果及年代地层格架剖面
剖面位置见图1(c) C-C'

层系, 岩性以湖相和河流相的砂岩、泥岩为主, 局部发育有砾岩和页岩(图3、4)。研究区内古近系构造层主要分布在徐水凹陷、霸县凹陷、白洋淀洼槽和大河镇洼槽内, 容城凸起和牛驼镇凸起上仅有少量发育(图5~7)。由洼槽向凸起方向, 地层厚度迅速减薄(图5、7)。古近系构造层的分布整体上受控于边界断层的活动, 同时该构造层内部也发育有数量众多、倾向各异的次级断层(图5、7)。

第四系-新近系构造层属于拗陷期产物, 岩性以河流相的砂、泥岩为主, 第四系多发育粉砂和砂质黏土(图3). 该构造层分布范围远大于古近系构造层, 在研究区内全区分布(图5~7). 地震剖面显示, 该构造层内地层产状较为平缓, 整体略向东倾斜, 厚度由西向东逐渐加厚(图5、7). 该构造层发育时期, 构造活动微弱, 断层数量明显减少且主要集中在研究区的东部(图5、7).

4 断裂特征

4.1 断裂剖面特征

太行山山前断层是冀中拗陷最主要的边界断层,控制了整个冀中拗陷新生代向SE方向的伸展滑移,断层面整体上陡下缓的犁式特征,走向NE,倾向SE,滑脱面深度为5500~6000ms(双程旅行时间,下同)(图5)。沿走向上,太行山山前断层在冀中拗陷内延伸长度大于190km。研究区内,该断层在剖面上表现出多次转折的特征,相间发育多个向形转折点和背形转折点,使其在局部范围内呈现出坡坪式正断层形态(图5、7)。地震剖面解释结果显示,太行山山前断层控制了研究区前新生界的旋转、水平迁移和徐水凹陷内新生界的沉积,且断层在新近纪仍有一定程度的活动。

容城断层在剖面上表现为典型的犁式正断层(图 5), 控制了白洋淀洼槽内古近系的沉积; 大兴断层作为

图9 雄安新区新近系底面(T_2)等 T_0 构造图

该图显示, 前文所述的主要断层除牛东断层外, 其余均未切穿新近系底面; 该界面上牛东断层呈NNE走向, 倾向SE, 断距明显减小. 除牛东断层外, 研究区内切穿新近系底界面的断层以NEE向为主, 断距普遍较小, 且集中发育于牛东断层以东的霸县凹陷内. 这一特征表明, 雄安新区新近纪以来的拉张方向以NNW-SSE向为主.

该图还显示, 研究区内新近系底面自北西向南东埋深逐渐加大, 并且以高家堡为界发育两个沉积中心. 容城凸起、牛驼镇凸起仍表现为构造高部位, 但规模相对较小.

4.3 断裂的三维结构

综合研究区内钻井和地震资料的解释结果, 能够直观地认识雄安新区主要断裂的三维地质结构(图10). 总体而言, 雄安及邻区在太行山山前断层、大兴断层、容城断层、牛东断层等的控制下, 表现出凸起和凹陷相间分布的构造格局. 不同断层之间的相互叠置控制了研究区整体的构造形态. 徐水凹陷-容城凸起、

白洋淀-大河镇洼槽-牛驼镇凸起、霸县凹陷-文安斜坡-大城凸起共同构成了NE-NNE向雁列状展布的构造带.

图10更加直观地显示出太行山山前断层在经过徐水凹陷之后向盆地内发生转折, 其北部与大兴断层南段相互叠接, 导致容城凸起顶面的倾向由NW变为NNW. 区域地质资料表明, 太行山山前断层在发生转折之后继续向北延伸, 控制了整个冀中拗陷的伸展(杨明慧等, 2002a; 孙冬胜等, 2004).

大兴断层是冀中拗陷北部一条重要的边界断层, 控制了大河镇洼槽、廊固凹陷和大厂凹陷的发育(桂宝玲等, 2011, 2012; 何登发等, 2017b), 其向南延伸的部分走向为近SN向, 使其南段整体呈弧形, 延伸至安新附近趋于终止. 其大规模伸展作用直接控制了牛驼镇凸起的构造形态(何登发等, 2017b). 二维地震剖面清晰地揭示了大兴断层往南断距逐渐减小的特征, 并且其下盘发育了容城断层作为分支断层.

牛东断层作为霸县凹陷的边界断层, 控制了霸县凹陷-文安斜坡-大城凸起的整体构造形态. 该断层与

图 10 雄安新区断裂三维结构图

大兴断层呈雁列状展布, 并在南段与大兴断层发生叠接, 共同控制了牛驼镇凸起的形成演化。但从盆地内部钻井及地震资料来看, 牛东断层的发育时间要晚于大兴断层。而地震剖面及整体三维结构均显示, 牛东断层的滑脱面深度要大于大兴断层, 且牛东断层的倾角也相对较大。

5 讨论

5.1 构造转换关系

冀中拗陷内部发育两条重要的构造转换带: 徐水-安新构造带和衡水构造带。据此, 将冀中拗陷分为北、中、南三部分(孙冬胜, 2001)。雄安新区刚好位于徐水-安新转换带附近, 在构造位置上处于冀中拗陷中部与北部的过渡部位(图1)。

徐水-安新转换带对应于太行山山前断层发生转折的位置, 同时也是牛东断层和其南部的马西-陵城断层发生转换过渡的位置(见何登发等, 2017b图1)。该构

造带与冀中拗陷内NNE向的构造线呈大角度相交。其北部发育一系列雁列式展布的大型边界断层, 如大兴断层、牛东断层等, 这些断层往往呈NE或NNE向展布, 分别控制了冀中拗陷北部廊固、霸县等多个“西断东超”的凹陷的发育; 而该构造带南部则表现出明显的差异性, 冀中拗陷中部在太行山山前断层和马西-陵城断层的控制下, 表现出“双断式”的特征, 整体呈宽缓的背斜形态, 除太行山山前断层之外, 其他规模较大的断层多呈NW走向, 倾向SW(何登发等, 2017b)。此外, 布格重力异常资料显示, 徐水-安新构造带附近对应于正异常值的减小(魏文博等, 2006; Zheng 等, 2006)。

5.2 雄安新区的构造演化

中生代晚期, 华北东部构造体制由挤压为主转为拉张为主(翟明国等, 2003, 2004; 朱日祥等, 2011), 导致华北克拉通东部岩石圈发生大规模减薄(Chen, 2010; 朱日祥等, 2011)。在此背景下, 渤海湾盆地开始发育(李三忠等, 2010), 冀中拗陷也进入断陷阶段。之

后, 坳陷内的断陷活动持续发育至古近纪末(Allen 等, 1997; 杨明慧等, 2002a, 2002b; 孙冬胜等, 2004), 并表现出显著的幕式特征(马杏垣等, 1983; 漆家福等, 1995; Allen 等, 1997)。

雄安新区于古近纪早期进入断陷阶段。古新世-早始新世(相当于孔店组-沙四段沉积时期), 太行山山前

断层、大兴断层、牛东断层均发生正断活动, 在其上盘相应地发育了徐水凹陷、大河镇洼槽和霸县凹陷。研究区内凸起和凹陷相间分布的构造格局初步形成(图11)。根据各沉积单元内的地层厚度及半地堑的规模判断, 太行山山前断层的活动强度最大。根据平衡剖面计算, 这一时期的伸展量可达15.6km, 伸展率约

图 11 雄安新区NW-SE向构造演化剖面
剖面位置见图1 C-C'

为46.8%.

早-中始新世(沙三段-沙二段沉积时期), 太行山山前断层活动强度有所减弱, 而大兴断层活动强度明显增加, 牛东断层也继续活动, 与此同时, 一些次级断层也持续发育. 这一时期, 总的伸展量约为9.75km, 伸展率为19.9%.

晚始新世-渐新世(沙一段-东营组沉积时期), 断陷活动主要集中在徐水凹陷和霸县凹陷, 二者之间的大河镇洼槽内则未接受沉积. 由于断层的强烈伸展, 其下盘发生大幅度的掀斜、抬升, 并形成凸起. 至此, 雄安新区凸起和凹陷相间分布的构造格局基本定型. 这一时期总的伸展量为2.76km, 伸展率约为4.71%. 东营组沉积末期, 区域性的抬升使得早期形成的沉积地层遭受明显剥蚀(图5, 图7, 图10), 产生了馆陶组底部的不整合面.

新近纪-第四纪(馆陶组-平原组沉积时期), 研究区

内断陷活动明显减弱, 除牛东断层仍有一定程度的活动外, 其他主要断层均已停止活动. 在此期间, 产生了一系列次级断层, 这些断层主要集中在牛东断层以东的霸县凹陷内(图5, 图7). 新近纪-第四纪, 研究区主要发生热沉降, 伸展量约为0.71km, 伸展率为1.16%.

5.3 后期构造活动与地壳稳定性

对比新近系底面(图9)和古近系底面(图8)的等 T_0 图可以发现, 研究区内的断层分布特征发生了明显的改变. 古近纪期间, 伸展活动主要集中于大型边界断层, 太行山山前断层、容城断层、大兴断层和牛东断层等均发生强烈活动, 并普遍具有较大的断距; 新近纪以来, 除牛东断层外, 上述断层均已停止活动, 而牛东断层的活动强度也明显减弱. 另外, 一个比较明显的特征是, 霸县凹陷内在近新纪以来发育了数量较多的NEE向次级断层(图9). 尽管这些断层的断距普遍较小,

图 12 雄安新区新近纪以来发育的次级断层的地震剖面特征(左列)与其线条图(右列)

上图剖面位置见图5矩形框, 下图剖面位置见图7矩形框

但地震剖面显示, 其切穿的层位都比较新, 有些甚至断穿整个新近系-第四系至地表附近(图12). 在霸县凹陷以西的大河镇洼槽和徐水凹陷内, 次级断层也有零星分布(图7), 而牛驼镇凸起和容城凸起上基本不发育.

雄安新区及邻区区域地震构造图显示, 新构造运动以来的地震事件(3.0级以上)多数分布在牛驼镇凸起南缘断裂(即牛东断层)的东南侧(图13), 且震级普遍较小(多为3.0~3.9级). 值得注意的是, 大河镇洼槽所在区域于公元1679年发生过一次Mw5.75级地震(徐锡伟等, 2016), 除此以外, 雄安新区范围内未发生明显的地震活动(图13).

研究区内地震剖面揭示的断层发育特征和区域地震构造图上显示的地震分布规律均表明, 雄安新区新近纪以来处于较为稳定的构造位置, 而其以东的霸县凹陷等地区则具有明显的构造活动性.

5.4 资源环境效应

雄安新区是华北油田的重要产区(图1), 其中, 霸县境内共有油井1000余口, 年产原油 70×10^4 t, 天然气

$1.8 \times 10^7 \text{m}^3$ (张万益等, 2017). 除油气之外, 雄安新区还蕴藏着丰富的地热资源, 其具有面积大、储量高的特点, 并且埋藏浅, 水温高, 水质优, 自喷能力强(李卫卫等, 2014; 张万益等, 2017). 其中, 牛驼镇凸起地热田更是作为我国中低温地热开发利用的示范区.

大量油气勘探实践表明, 雄安新区的有利储集层主要发育层段为蓟县系雾迷山组(赵贤正等, 2012, 2014). 通过对地层和断裂系统的研究可以发现, 该优势储集层的发育明显受控于研究区的地质结构. 大型边界断层的强烈伸展, 往往使得其下盘发生大幅度的掀斜、抬升, 并导致凸起顶部遭受风化改造, 从而有利于储集空间的发育. 由于碳酸盐岩储层物性受埋深影响较小, 在凹陷内埋深较大的部位仍可以发育好的储层(杜金虎等, 2012; 赵贤正等, 2014). 研究也表明, 雄安新区地热田的主要储层同样为蓟县系雾迷山组碳酸盐岩(李卫卫等, 2014), 由于其具有较大的孔隙空间和较高的热导率, 为热流体的储存和热传导提供了有利条件.

研究区的地质结构不仅影响了储集层的发育, 对

图 13 雄安新区及邻区区域地震构造图(据徐锡伟等, 2016修改)

油气和地热资源的分布也有着重要的控制作用. 凸起和凹陷相间分布的构造格局使得凹陷区成为主力烃源岩发育的场所, 而断层则为油气的运移提供了良好的通道, 这种配置十分有利于潜山油气藏的形成(赵贤正等, 2012; 何登发等, 2017b). 同样地, 该构造格局和断裂分布也有利于热流的传导(李卫卫等, 2014; 李弘等, 2017), 凹陷内厚度较大的低热导率沉积层有效地阻碍了热流的传导, 而凸起上热导率较高的地层则成为热流运移的优势方向, 在断层的输导下, 使得热流向凸起区聚集.

6 结论

(1) 结合钻井、地震和区域地质资料, 在雄安新区厘定出中元古界长城系底部、古近系底部和新近系底部3个区域不整合面, 据此, 在纵向上划分出4个构造层: 古元古界-太古宇构造层、中元古界构造层、古近系构造层和第四系-新近系构造层.

(2) 雄安新区主要发育太行山山前、大兴、容城、牛东等大型边界断层. 在这些断层的共同作用下, 研究区表现出凸起和凹陷相间分布的构造格局. 研究区断陷过程始于古近纪早期, 并表现出明显的幕式特征, 伸展量和伸展率逐渐减小.

(3) 研究区内次级断层的剖面、平面特征和区域地震分布规律表明, 雄安新区新近纪以来处于相对稳定的构造位置, 而其以东的霸县凹陷等地区则具有明显的构造活动性.

(4) 雄安新区凸起和凹陷相间发育的构造格局和断裂分布特征, 对区内石油、天然气和地热资源的储集条件和富集规律有着重要的控制作用.

致谢 中石油华北油田分公司勘探开发研究院提供了相应的钻井和地震资料, 中国地震局地质研究所活动断层探测数据汇交与共享管理中心提供了研究区活动断层数据, 两位审稿专家对本文提出了非常中肯的意见和建议, 一并表示感谢.

参考文献

杜金虎, 赵贤正, 张以明, 张锐锋, 曹兰柱, 田建章. 2012. 牛东1风险探井重大发现及其意义. 中国石油勘探, 17: 1-7
葛肖虹, 马文璞. 2014. 中国区域大地构造学教程. 北京: 地质出版社.

163-215
桂宝玲, 何登发, 闫福旺, 张文君. 2011. 廊固凹陷的三维精细地质结构. 地质科学, 46: 787-797
桂宝玲, 何登发, 闫福旺, 张文君. 2012. 大兴断层的三维几何学与运动学及其对廊固凹陷成因机制的约束. 地学前缘, 19: 86-99
何登发, 周新源, 张朝军, 杨文静, 石昕. 2006. 塔里木多旋回叠合盆地地质结构特征. 中国石油勘探, 11: 31-41
何登发, 马永生, 蔡勋育, 张健, 张义杰. 2017a. 中国西部海相盆地地质结构控制油气分布的比较研究. 岩石学报, 33: 1037-1057
何登发, 崔永谦, 张煜颖, 单帅强, 肖阳, 张传宝, 周从安, 高园. 2017b. 渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的构造成因类型. 岩石学报, 33: 1338-1356
贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社. 1-438
李德生. 1980. 渤海湾含油气盆地的地质和构造特征. 石油学报, 1: 8-22
李德生. 1982. 中国含油气盆地的构造类型. 石油学报, 3: 1-12
李弘, 俞建宝, 吕慧, 肖鹏飞. 2017. 雄县地热田重磁响应及控热构造特征研究. 物探与化探, 41: 242-248
李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 刘丽萍, 金宠, 刘鑫, 郝天眺, 周立宏, 刘保华, 周均太, 焦倩. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. 地学前缘, 17: 64-89
李卫卫, 饶松, 唐晓音, 姜光政, 胡圣标, 孔彦龙, 庞菊梅, 王建存. 2014. 河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征. 地质科学, 49: 850-863
刘池洋. 1986. 古沧县-天津复向斜和其确定的依据. 石油与天然气地质, 7: 333-343
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, 57: 22-32
彭建兵, 范文, 李喜安, 王庆良, 冯希杰, 张骏, 李新生, 卢全中, 黄强兵, 马润勇, 卢玉东. 2007. 汾渭盆地地裂成因研究中的若干关键问题. 工程地质学报, 15: 433-440
彭澎, 翟明国. 2002. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质. 地球科学进展, 17: 818-825
漆家福, 张一伟, 陆克政, 杨桥. 1995. 渤海湾盆地新生代构造演化. 石油大学学报, 19(增刊): 1-6
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. 地学前缘, 10(增刊): 199-206
单帅强, 何登发, 张煜颖. 2016. 渤海湾盆地西部保定凹陷构造——地层层序与盆地演化. 地质科学, 51: 402-414
孙冬胜. 2001. 冀中坳陷中区中新世复合伸展构造. 博士学位论文. 西安: 西北大学. 1-99
孙冬胜, 刘池阳, 杨明慧, 杜金虎, 张以明, 张锐锋. 2004. 渤海湾盆地冀中坳陷中区中新世复合伸展构造. 地质论评, 50: 484-491
童晓光, 梁狄刚. 1992. 塔里木盆地油气勘探论文集. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社. 17-22

- 万天丰. 2011. 中国大地构造学. 北京: 地质出版社. 4-5
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京: 地图出版社. 41-130
- 汪泽成. 2002. 四川盆地构造层序与天然气勘探. 北京: 地质出版社. 10-26
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 邓明, 景建恩. 2006. 华北地区大地电磁测深及岩石圈厚度讨论. 中国地质, 33: 762-772
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24: 1145-1174
- 徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平. 2016. 中国及邻区地震构造图. 北京: 地震出版社
- 杨明慧, 刘池阳, 杨斌谊, 赵红格. 2002a. 冀中拗陷古近纪的伸展构造. 地质论评, 18: 58-67
- 杨明慧, 刘池阳, 孙冬胜, 崔永谦. 2002b. 冀中拗陷的伸展构造系统及其构造背景. 大地构造与成矿学, 26: 113-120
- 于长春, 乔日新, 张迪硕. 2017. 雄安新区航磁推断的三维基底构造特征. 物探与化探, 41: 385-391
- 于福生, 漆家福, 王春英. 2002. 华北东部印支期构造变形研究. 中国矿业大学学报, 31: 402-406
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. 矿床地质, 29: 24-36
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆仁, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 913-920
- 翟明国, 孟庆仁, 刘建明, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟, 邵济安, 朱日祥. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘, 11: 285-297
- 张善文, 隋风贵, 林会喜, 刘华, 张守鹏, 李钜源. 2009. 渤海湾盆地前古近系油气地质与远景评价. 北京: 地质出版社. 78-81
- 张万益, 贾德龙, 王尧, 姚晓峰. 2017. 地质调查: 雄安新区建设先“摸底”. 中国发展观察, 11: 22-23
- 赵贤正, 王权, 金凤鸣, 王海潮, 罗金洋, 曾溅辉, 范炳达. 2012. 冀中拗陷隐蔽型潜山油气藏主控因素与勘探实践. 石油学报, 33(增刊): 71-79
- 赵贤正, 金凤鸣, 王权, 韩春元, 董雄英. 2014. 冀中拗陷隐蔽型潜山及潜山内幕油气藏的勘探发现与认识. 中国石油勘探, 19: 10-21
- 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: 583-592
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42: 1135-1159
- Allen M B, Macdonald D I M, Xun Z, Vincent S J, Brouet-Menzies C. 1997. Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China. *Mar Pet Geol*, 14: 951-972
- Cao X, Li S, Xu L, Guo L, Liu L, Zhao S, Liu X, Dai L. 2015. Mesozoic-Cenozoic evolution and mechanism of tectonic geomorphology in the central North China Block: Constraint from apatite fission track thermochronology. *J Asian Earth Sci*, 114: 41-53
- Chen L. 2010. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications. *Lithos*, 120: 96-115
- He L, Wang J. 2003. Cenozoic thermal history of the Bohai Bay Basin: Constraints from heat flow and coupled basin-mountain modeling. *Phys Chem Earth Parts A/B/C*, 28: 421-429
- Kusky T M, Li J. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 22: 383-397
- Qi J, Yang Q. 2010. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China. *Mar Pet Geol*, 27: 757-771
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction. *Precambrian Res*, 178: 149-167
- Zha Q H. 1984. Jizhong Depression, China—Its geologic framework, evolutionary history, and distribution of hydrocarbons. *AAPG Bull*, 68: 983-992
- Zhao G, Sun M, Wilde S A, Sanzhong L. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 136: 177-202
- Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 107: 45-73
- Zhao X, Jin F, Wang Q, Bai G. 2015. Buried-hill play, Jizhong subbasin, Bohai Bay basin: A review and future prospectivity. *AAPG Bull*, 99: 1-26
- Zheng T, Chen L, Zhao L, Xu W, Zhu R. 2006. Crust-mantle structure difference across the gravity gradient zone in North China Craton: Seismic image of the thinned continental crust. *Phys Earth Planet Inter*, 159: 43-58

(责任编辑: 董云鹏)