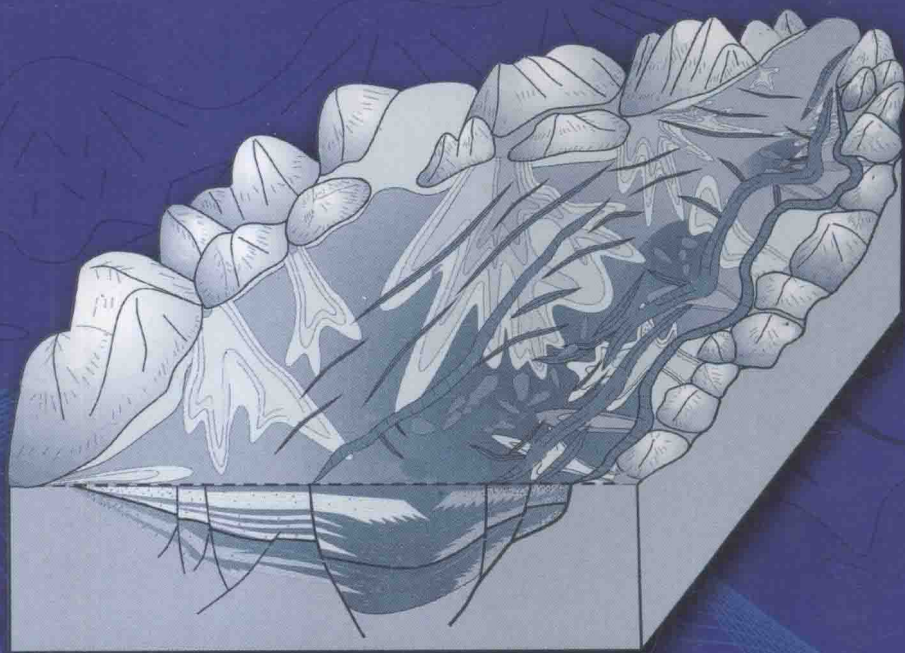


陆相复杂断陷盆地 隐蔽油气藏砂体预测

——以苏北高邮凹陷为例

董桂玉 邱旭明 刘玉瑞 张振国 高莲凤 著

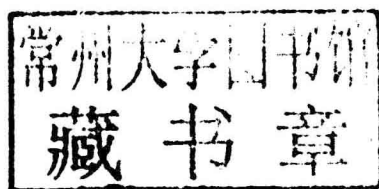


石油工业出版社

陆相复杂断陷盆地 隐蔽油气藏砂体预测

——以苏北高邮凹陷为例

董桂玉 邱旭明 刘玉瑞 张振国 高莲凤 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书重点阐述了以基准面为杠杆,以古地貌核心特征参数为支撑点,立足于整个“源区—搬运—沉积”过程,建立了一套基准面调控下的物源体系(“梁”) + 供给体系(“沟”) + 坡折体系(“坡”)三大古地貌特征参数有效耦合的陆相复杂断陷盆地隐蔽油气藏的砂体预测技术。

本书可供从事石油地质研究以及油气勘探的科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

陆相复杂断陷盆地隐蔽油气藏砂体预测——以苏北高邮凹陷为例/董桂玉, 邱旭明, 刘玉瑞等著. —北京:石油工业出版社, 2013. 8

ISBN 978 - 7 - 5021 - 9751 - 3

I. 陆…

II. ①董…②邱…③刘…

III. 陆相 - 断陷盆地 - 油气藏 - 预测技术 - 高邮市

IV. P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 211901 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: [www. petropub. com. cn](http://www.petropub.com.cn)

编辑部: (010) 64523543 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 16. 75

字数: 428 千字

定价: 80. 00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

由于目前能源危机日益严重,许多国家对能源的重视程度达到了空前的高度,尤其是油气资源,成为许多国家最重要的一种战略资源。在这种情况下,寻找和扩大油气资源的任务也日益迫切,然而国内外大部分油气田的勘探程度已相对较高,可采量也在逐年下降,为稳产增储,投入的成本显著增加,勘探风险也在不断加大,为此,对已找到的含油气盆地、或尚未进行勘探的盆地进行科学地分析研究,为预测和发现新的油气资源指出方向,已成为全世界油气地质工作者面临的重大课题。

苏北盆地高邮凹陷目前已进入了中—高成熟勘探阶段,长期以来,高邮凹陷戴南组主要针对构造圈闭进行勘探,随着凹陷油气勘探的深入,探明程度越来越高,发现构造圈闭的难度越来越大,原有沉积体系的研究成果已不适应当前勘探开发的需要,为满足老区挖潜和寻找“三新”(新区带、新层系和新圈闭)目标的需要,有待于进一步深化精细岩相古地理研究的工作。此外,随着大量原始资料的积累以及稳定油田生产甚至大发展的需要,寻找隐蔽油气藏已成为高邮凹陷今后勘探的主攻方向。在油气勘探实践中发现,高邮凹陷戴南组砂体规模相对较小,易形成隐蔽圈闭,目前已发现了一些构造—岩性复合型油气藏,展示了戴南组具备较好的隐蔽油气藏的勘探前景。与构造圈闭相比,由于隐蔽油气藏的形成及类型具有纵向“层控”和横向“相控”的规律性,即纵向上受控于层序格架内不同体系域类型或不同级次的基准面旋回,横向上受控于古地貌特征控制的相带展布,因此导致隐蔽圈闭的识别与评价存在更大困难,勘探风险更大,需要更先进的理论指导和技术支持。

苏北盆地高邮凹陷断裂系统发育、多物源供给、相带复杂,隐蔽油气藏砂体分布范围广且类型繁多,既有牵引流成因(包括表层原生牵引流、底层原生牵引流、表层派生牵引流、底层派生牵引流)又有重力流成因(包括滑坡堆积物、砂质碎屑流和部分浊流),还受潮流、波浪、风暴和地震等因素的影响(尤其是南部陡坡带和汉留断裂带附近,发育大量的具丘—洼交错层理、“人”字形、束敛状浪成波纹交错层理的风暴岩和具准同生变形构造+完整应力释放序列的震积岩),从而导致高邮凹陷隐蔽油气藏砂体展布规律尤为复杂;此外,古隆起的下方未必有扇体,沟谷发育的断阶带下方未必一定是砂扇,往往为大规模的泥扇;层序界面附近也不一定有砂体富集;沉积体不一定形成规则的扇体,往往在平面上呈不规则体分布。

因此,要解决以上问题,必须深刻理解砂体发育规律的内涵和核心影响因素。

沉积基准面的升降运动决定了盆地的沉积作用状态和作用特征。首先,基准面变化影响着物源区规模和供给方式,间接决定了砂体发育的先决条件;其次,基准面变化决定了砂体发育的纵向位置;再次,基准面的级别影响着砂体的规模。

构造运动造就的古地貌在陆相盆地,尤其是断陷盆地对沉积砂体的形成和发育起着重要的控制作用。表征古地貌的参数很多,一类是与古地貌属性相关的参数,主要包括厚度和古水深;一类是与古地貌特征相关的参数,主要包括古物源、古沟谷、古凸起和古坡折等。其中,古地貌特征参数对砂体发育影响十分明显,尤其是古物源、古沟谷和古坡折带。一般来说,物源区的继承性、供给方式和母岩的性质对沉积砂体的规模和岩石类型有着直接的影响;古沟谷除了起输砂通道作用外,还往往是砂体优先充填的部位;古坡折带对砂体起到分异和聚集的作用,即前人提出的“断坡控砂”理论。

本次研究,以基准面为杠杆,以古地貌核心特征参数为支撑点,立足于整个“源区—搬运—沉积”过程,建立了一套基准面调控下的物源体系(“梁”) + 供给体系(“沟”) + 坡折体系(“坡”)三大古地貌特征参数有效耦合的陆相复杂断陷盆地隐蔽油气藏砂体预测技术。此套砂体预测技术强调多因素控砂、强调多因素在时空上的有效配置、强调动态因素调控静态因素,进而能更科学地预测砂体发育规律。其中,在预测水携沉积砂体时,只有在系统分析“梁” + “沟” + “坡”三大古地貌特征参数的耦合情况下,才能准确判定湖盆内砂体是否发育,而砂体规模大小的变化,必须通过“面”的分析,才能相对准确地把握;对于由岩崩、滑动—滑塌而引起的块体—沉积物重力流成因的砂体,在了解外界激发条件的情况下,只要满足“梁” + “坡”的耦合,就能初步判定此类砂体的发育程度,而砂体规模大小的变化也同样受到“面”的控制。

在成书的过程中,得到了中国石油大学(北京)朱筱敏教授和长江大学何幼斌教授的指导和帮助,在此表示真诚的感谢!感谢中国石化江苏油田博士后科研工作站和地质科学研究所的大力支持!感谢河北联合大学冷春鹏、李宗峰和李坤等研究生对本书的编辑和排版等方面所做的工作!同时对书中出现文献资料的作者深表谢意!

虽然对苏北盆地高邮凹陷开展了隐蔽油气藏砂体预测方面的工作,但是由于个人水平的限制,书中难免存在错误及欠妥之处,恳请专家和读者予以批评指正。

目 录

第一章 区域地质概况	(1)
第一节 区域构造背景	(1)
第二节 区域构造演化	(6)
第三节 区域地层特征	(12)
第四节 高邮凹陷勘探概况	(17)
第二章 高分辨率层序地层学研究	(18)
第一节 层序界面成因类型及其识别标志	(18)
第二节 层序地层划分方案和各级次层序基本特征	(25)
第三节 层序地层格架	(29)
第三章 物源研究	(41)
第一节 源区构造背景和母岩归属研究	(41)
第二节 物源方向分析	(76)
第四章 古地貌特征参数—古沟谷及坡折体系研究	(129)
第一节 古沟谷类型与特征	(129)
第二节 坡折带类型与特征	(133)
第三节 古沟谷和坡折带体系的平面分布特征	(142)
第五章 沉积体系研究	(148)
第一节 沉积相类型及其特征	(149)
第二节 沉积演化	(195)
第六章 砂体分布规律研究	(232)
第一节 砂体成因类型	(232)
第二节 砂体的控制因素与分布规律	(238)
第三节 建议	(253)
参考文献	(254)
附图	(258)

第一章 区域地质概况

从大地构造位置上看,苏北盆地位于鲁苏造山带南侧、郯庐断裂带东侧的扬子地台的东北边缘,面积约 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,属于苏北—南黄海盆地的陆上部分。苏北盆地新生代呈近 EW 走向的“一隆二坳”构造格局(图 1-1)。东台坳陷和盐阜坳陷又由金湖凹陷、高邮凹陷、溱潼凹陷、海安凹陷、盐城凹陷、洪泽凹陷等 11 个箕状断陷与柳堡、菱塘桥、柘垛、吴堡、泰州、梁垛、小海、苏家嘴、淮安等凸起、低凸起构成,其中每个凹陷又可细划出 3~6 个次凹和相应的构造高带,整体来看,苏北新生代盆地是典型的多凸多凹、分割性极强的盆地。

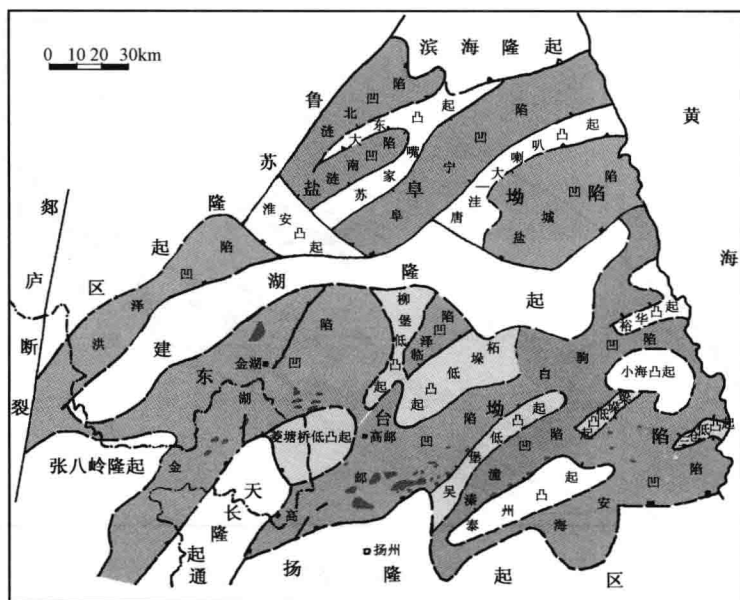


图 1-1 苏北盆地新生代构造区划图

第一节 区域构造背景

高邮凹陷在构造上位于苏北盆地东台坳陷中部,东西长约 100km,南北宽约 25~35km,面积 2670 km^2 (图 1-1,图 1-2)(程国锋等,2009)。高邮凹陷形成于晚白垩世仪征运动,之后经历了吴堡、三垛等几次大的构造运动,真①和吴①断层为凹陷的边界大断层,真②断层及汉留断层为次一级断层,汉留断层为真武断裂的次一级反向补偿断层。受控于这些大断层,高邮凹陷总体构造格局为南断北超、南陡北缓的箕状断陷结构。南部以大断层与通扬隆起和吴堡低凸起相邻,北部以平缓的斜坡与柘垛低凸起相接,西部以柳堡和菱塘桥二低凸起间的鞍部与金湖凹陷相通,东邻白驹凹陷。

一、构造单元划分

高邮凹陷平面上由南往北分为南部断阶带、深凹带和北部斜坡带三个构造带(图1-2)。南部真①、吴①断层是高邮凹陷与通扬隆起及吴堡低凸起的分界断层,黄②、真②断层是深凹带与南部断阶带的分界断层,汉留断层是深凹带与北部斜坡带的分界断层,吴②断层是斜坡带与吴堡断阶带的分界断层。在东西方向上,以三垛—沙墟—富民一线为界,西部属双断地堑式断陷结构,由南往北断阶、深凹、斜坡三分清楚;东部属单断单斜式断陷结构,由于汉留断裂向东逐渐消亡,深凹与斜坡无明显分界。南部断阶带为东西长约100km、南北宽2~3km的长条形的二级构造单元;北部斜坡带是面积最大的一个二级构造单元,北部与柘垛低凸起和菱塘桥低凸起相连,斜坡和低凸起之间没有明显的规模较大的断层作为构造单元的划分界线。

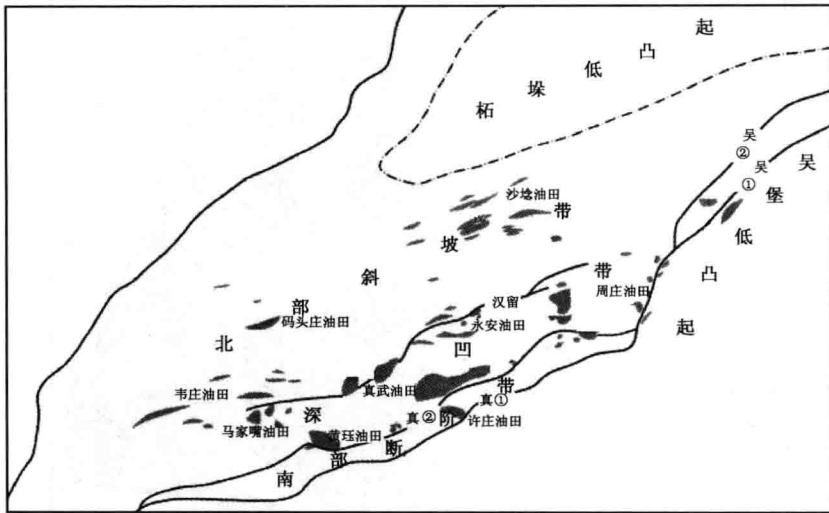


图1-2 高邮凹陷构造单元划分图

二、主要断裂体系

高邮凹陷中、新生代断裂系统由NNE、NE、近EW和NW向的四组不同级别的断裂构造构成,其主导断裂为NNE、NE向的基底主干大断层,由此派生形成的次级断层以NNE、NE和近EW向为主。主要断裂有真武断裂带、吴堡断裂带和汉留断裂带。真武断裂带和吴堡断裂带是高邮凹陷的南部边界断裂,汉留断裂带是北部斜坡带与深凹带的分界断裂。这些主断裂带对高邮凹陷的构造沉积演化起着绝对的控制作用。

1. 真武断裂带

真武断裂带是高邮凹陷的南部边界,同时也是苏北盆地的南部边界断裂带,分隔了苏北盆地和苏南隆起区。真武断裂带总体走向为NE—NNE,倾向为NW,总长度约为80km。真武断裂带主要包括真①断裂和真②断裂,二者控制了高邮凹陷南部断阶带西段的范围(图1-3)。

作为苏北盆地南部边界的真武断裂带其活动时期长、规模大。真①断裂西起黄珏,东至吴堡,长达71km,断层下切至古生界,上切至新近系盐二段。真①断裂倾角在纵向上变化显

著,在浅层超过 50° ,向深部很快变缓,在 4500m 深度已经接近 30° 。真武断裂是在早期逆冲断层基础上反转形成的边界正断层。真② 断裂西起黄珏,东至周庄,长达 51km,向下终止于真① 断裂,上切至新近系盐二段。真② 断裂在盆地的浅部表现为 3 条断层以北东向首尾相叠。

2. 汉留断裂带

汉留断裂为发育于真① 断裂上盘的反向断裂,与真② 断裂共同控制了高邮凹陷西段深凹带的分布。汉留断裂由多条南倾断层组成复杂断裂,断裂沿走向控制的地层形态发生明显变化(图 1-4)。在断裂带西部汉留断裂终止于真② 断裂之上,汉留断裂为平面式,而真② 断裂近铲式,上盘地层向真② 断裂方向倾斜;在断裂带中部,汉留断裂与真② 断裂规模基本相当,形态相近,深凹带地层基本为水平或对称的下凹;在断裂带东部的部分位置,汉留断裂表现出比真② 断裂更强的活动性,上盘地层向汉留断裂方向倾斜。汉留断裂和真② 断裂都是在真① 断裂上盘发育的,三者在不同的地质历史时期和不同的部位具有复杂的联动关系,共同构成了高邮凹陷中最复杂的伸展断裂系统。

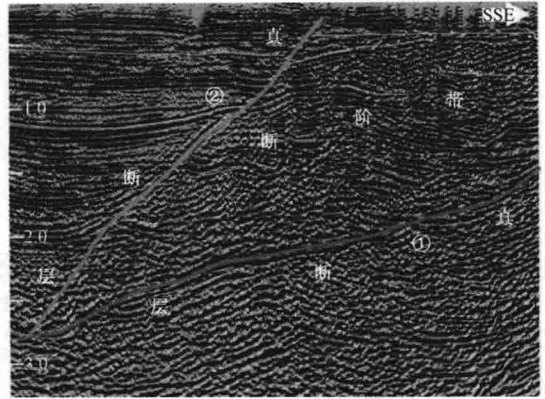
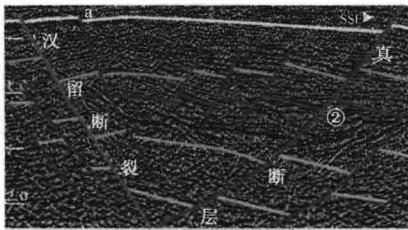
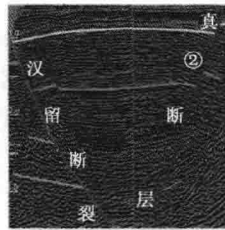


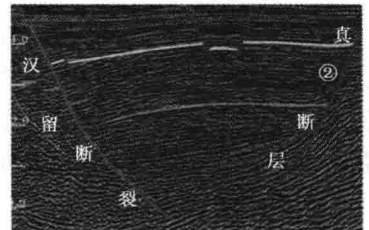
图 1-3 高邮凹陷西部真武断裂结构特征



(a)西部地震解释剖面



(b)中部地震解释剖面



(c)东部地震解释剖面

图 1-4 汉留断裂与真② 断层相互关系

3. 吴堡断裂带

吴堡断裂带总体为北东走向,总长度约 100km,是高邮凹陷与吴堡低凸起以及白驹凹陷与海安凹陷的分界断裂。吴堡断裂带由 3 条主要断层首尾相互叠置构成(图 1-5)。吴① 断层西部与真① 断裂交会,东至陈堡东分解为树枝状消失,长约 30km,吴① 断层以铲式正断层为特征,上盘泰州组—阜宁组厚度变化不大,而戴南组向柘垛低凸起方向明显减薄,上盘 T_3^0 反射界面发生牵引,而 T_2^3 反射界面发生逆牵引,下盘泰二段—阜一段厚度变化不大,而阜二段—阜四段发生明显的向北翘起被削截,下盘无戴南组,三垛组也表现为明显的顶部削蚀;吴② 断层西起陈堡,由北东方向转为北东东方向经白驹凹陷延伸至小海凸起的西部,长约 60km,吴② 断层主体以坡坪式断层为特征,断层形态的变化在上盘形成凹—隆—凹的格局;吴③ 断层西起吴堡低凸起的东部,经小海凸起北缘,向东延伸至海域,断层主体段剖面略有铲式形态,长约 40km。

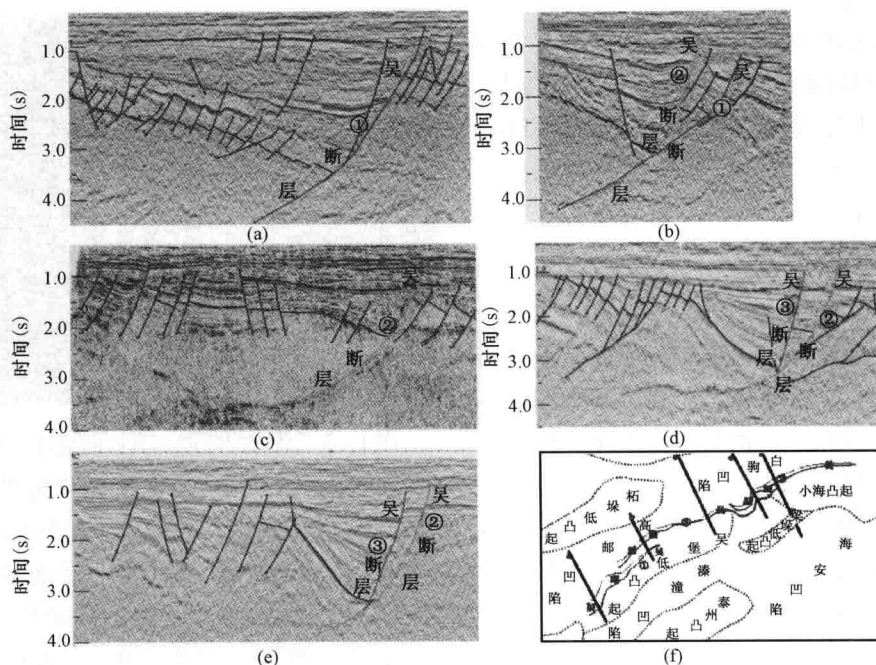


图 1-5 吴堡断裂带不同位置结构特征

三、构造样式

构造样式是指一组相关构造的总体特征。高邮凹陷的构造变形以断裂为主,但是不同构造区带(或构造部位)的构造样式有明显的差异。依据断层组合关系,可将高邮凹陷的构造样式分为3种9类(图1-6),虽然构造样式本身只是构造要素的空间形态特征,但不同样式的构造变形包含不同的运动学和动力学意义。

1. 基底卷入型

样式 I 和样式 II 是基底卷入的主干边界断裂带形成的构造变形样式。这种构造样式主要发育在高邮凹陷边界附近。断裂带可能由多条断层构成,这些断层多表现为同向倾斜,向深层延伸可以收敛到一条主干断层面上构成铲式正断层,主要发育在高邮凹陷南部真①和真②所控制的断阶带(样式 I),也可彼此以软连接方式组合在一起,部分断层向深层位移减小并在基底尖灭,只有主断层与深层拆离断层连锁在一起,主要发育在高邮凹陷东南部吴堡断裂带和汉留断裂带(样式 II)。在平面构造图中,主干边界断裂带可以是多条基底卷入断层交织在一起构成复杂的断裂带,许庄—曹庄地区就是由多条近东西向和北东向断层共同交织形成复杂断裂带;也可以是产状相同的几条断层平行延伸构成断阶带,黄珏和邵伯地区形成的断阶带就属于该类型;或有一条主干断层在其尾部和旁侧发育若干斜向的分支断层构成的帚状断层组,如吴②断层和真②断层的西端形成的断层组均属于这种样式。多条基底卷入断层之间为软连接,断裂带宽度一般相对较大,单条断层之间的位移沿走向可以发生变化,彼此之间位移相互消长,吴①断层与吴②断层以及真①断层和真②断层之间的断层的断距呈互补关系。

类型	名称	主要特征	示意图	主要分布区
基底卷入型	I 地层基底卷入铲式正断层扇	主干断层为铲式，向下可切割基底，分支断层向下收敛在主干断层上，形成正断层扇，与深层拆离断层直接连接		南断阶
	II 地台基底卷入正断层断阶带	主干断层为铲式，向下可切割基底，分支断层为平行式同向断层，向下尖灭，与主干断层为软连接		吴堡断裂带 汉留断裂带
盖层卷入型	III 地台盖层卷入复杂走滑变形构造带	在总体走向与主干断层斜交的次凸或低幅度背斜构造带上发育斜列的共轭正断层系，交换断层不发育		车逻鞍槽
	IV 地台盖层卷入非旋转共轭正断层系	两组共轭的平面式正断层，单条断层位移较小，向下在沉积盖层的软岩层中滑脱或尖灭		码头庄菱塘桥
	V 地台盖层卷入旋转共轭正断层系	两组共轭的铲式正断层，断层旋转形成宽缓背斜背景，单条断层位移较小，向下在沉积盖层中滑脱或尖灭		柘墩低凸起
	VI 地台盖层卷入非旋转正断层断阶带	产状相似的一组平面式正断层阶梯状断层系，单条断层位移较小，向下在沉积盖层中滑脱或尖灭		斜坡带
	VII 地台盖层卷入多米诺断层系	产状相似的一组旋转正断层系，单条断层可以小平面或铲式，位移较小，向下在沉积盖层中滑脱或尖灭		斜坡带
盖层滑脱型	VIII 盆地盖层滑脱（尖灭）正断层断阶带	产状相似的一组平面式正断层阶梯状断层系，单条断层位移较小，在盆地沉积层中表现为生长断层，并在盆地沉积层中滑脱或尖灭		吴岔河瓦庄东
	IX 盆地盖层滑脱（尖灭）共轭正断层系	共轭的两组正断层构成X型、V型样式，单条断层位移较小，在盆地沉积层中表现为生长断层，并在盆地沉积层中滑脱或尖灭		兴化地区

图 1-6 高邮凹陷构造样式类型

BF—地台基底卷入断层（可切割结晶基底或变质岩基底）；SF—地台盖层卷入断层（古生代地层中滑脱或尖灭）；

TF—构造转换带；K₂—C₂：晚白垩世—新生代盆地盖层；Pre-K₂：晚白垩世之前的地层，主要是地台盖层；

Pre-Z：震旦纪之前的地层，主要是地台基底变质岩

2. 地台盖层卷入型

样式Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ和Ⅶ是沉积盖层卷入的伸展构造变形样式。这类构造变形的共同特点是盆地盖层中的断层向下仅切割到地台盖层中,向上多数仅切割盆地盖层的“下部构造层”,因此单条断层垂直落差较小,但往往密集分布在同一构造区带。样式Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ和Ⅶ中的单条断层在几何形态上可以表现为“平面式”和“铲式”两种,在运动学特征上表现为“非旋转的”和“旋转的”正断层两类。样式Ⅲ是剖面样式类似地台盖层卷入旋转共轭正断层系,但是剖面上的正断层在平面上是斜列的或辫状交织在一起,并且发育在宽缓的横向或斜向背斜背景上,高邮凹陷西部的车逻鞍槽就发育构造样式Ⅲ。地台沉积盖层卷入的正断层彼此间产状基本相同或共轭出现,在剖面上可构成X型、V型、A型、W型和Y型等不同形式的组合,样式Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ和Ⅶ只是有代表性的几种构造变形样式。在高邮凹陷内部发育盖层卷入型构造样式,在码头庄地区发育构造样式Ⅴ,在沙埕地区发育有构造样式Ⅵ和构造样式Ⅶ等。

3. 盆地盖层滑脱型

样式Ⅷ、Ⅸ是断层末端在沉积盖层滑脱(尖灭)的伸展构造变形样式。这类构造变形的共同特点是正断层主要发育在盆地盖层内部,向下切割至盆地盖层的“下构造层”中滑脱或尖灭,在盆地盖层的“上构造层”中表现为同沉积断层特征,并可以一直切割到“上构造层”中。同样,盖层正断层单条断层垂直落差较小,在剖面上可构成X型、V型、A型、W型和Y型等不同形式的组合,在吴岔河—瓦庄东地区较为发育。

第二节 区域构造演化

复杂断块是对高邮凹陷地质特征的集中概括,其形成具有先天的地质背景、独特的演化过程和动力学机制。

一、盆地基底形成与演化

从大地构造位置上看,苏北盆地位于鲁苏造山带南侧、郯庐断裂带东侧的扬子地台的东北边缘。所谓扬子地台是指在新元古代末期完成克拉通化的地台基底之上沉积的海相沉积盖层。扬子地台是一个规模小而活动相对强烈的小型陆块,发育的地台型沉积地层包括震旦系、下古生界、上古生界和中、下三叠统等,不同时期受区域构造事件的影响而发生不同程度的区域构造变形。其中,印支—燕山运动中的板块碰撞和造山运动使处于碰撞前锋区的苏北盆地基底遭受了更为复杂强烈的挤压变形,后期苏北盆地的形成主要利用了印支—燕山期形成的逆冲断裂反转演化和发展的,因此复杂的基底结构和强烈的基底变形是苏北盆地复杂断块形成的先天地质基础。以下简要讨论盆地基底的演化过程。

1. 地台基底形成与演化

扬子地台基底由前震旦系构成,下扬子区南缘的皖南怀玉山区等地区出露的变粒岩、片岩、角闪岩等深变质岩和等结晶基底岩石的同位素地质年龄为1771Ma,巨厚变质流纹岩、安山质火山岩的同位素地质年龄为1026~1130Ma(曾萍等,1999)。这些深变质岩系上覆新元古界的千枚岩,表明下扬子区的地台基底是多次构造热作用的结果,经历了多次陆块的解体和拼合。已有的同位素年龄资料表明,下扬子区最古老的陆核可能是在新太古代—古元古代期间的吕梁运动和长城运动中形成的。在下扬子地区南黄海、大别山、苏南和苏北局部地区可能都

存在新太古代—古元古代结晶基底构成的微小古陆核。中元古代时期主要是古陆核多旋回的“开”、“合”构造运动,“开”导致古陆核裂陷和发育边缘裂陷槽、被动边缘盆地等,充填火山岩、沉积岩地层,“合”导致古陆核拼接和周缘的增生、变形和变质,并最终形成中元古代变质基底。新元古代青白口纪以“开”为主,导致在早期的结晶基底、变质基底上发育裂陷槽,充填青白口系,青白口纪末期的晋宁运动使下扬子区最终完成克拉通化过程,此时期华夏微陆块和扬子微陆块等主要微小陆块和岩浆弧等发生碰撞拼合,围绕微小陆块周边的新元古代大陆边缘沉积盆地发生褶皱造山和区域热变质,最终形成新元古代变质基底。

2. 地台盖层形成与演化

震旦纪—志留纪时期,为扬子区地台下部盖层发育阶段。早期扬子区地台主体为台地陆表海盆地,以北东向钱塘裂陷槽(坳拉槽)为中心,以浅海台地、浅海陆棚及较深海盆地相沉积为主,发育了深海—半深海盆地相的黑色页岩、深水藻类硅质岩、细碧岩、浊积岩及复理石建造,向两侧变为陆棚相和浅海台地相。晚奥陶世,加里东运动使扬子板块与华南板块逐渐拼贴后,导致华南海关关闭,全区海退,区域隆起褶皱,江绍断裂向下扬子区逆冲,上海—杭州—常山—线抬升剥蚀,江南隆起形成;可能由于基底构造的控制,灯影组、寒武系和奥陶系呈现出两凹两隆和两盆(棚)两台彼此对应、北东向展布的沉积、构造格局。

泥盆纪开始,扬子区进入地台上部盖层发育阶段。下扬子区进入古特提斯演化阶段,这一时期,下扬子区为独立于华北克拉通和扬子克拉通的构造单元(吴根耀等,2003;马力等,2004)。石炭纪开始,扬子克拉通与华北克拉通已经部分贴合隆起(冯增昭等,1998),而下扬子区脱离华南构造域,成为独立的构造单元。二叠纪时,江南断裂的右行走滑造成下扬子区继续向东漂移,处于现今的赤道位置附近(胡世玲等,1992;张永鸿等,1996)。

3. 印支—燕山期基底挤压变形

印支运动是中国东部乃至亚洲大陆构造演化中最重要的—次构造运动,亚洲东部与古太平洋的接触关系由大西洋式转化为太平洋式,古太平洋洋盆开始向亚洲大陆俯冲。早三叠世末期的印支运动使扬子地台与华北地台发生碰撞,这一构造事件不仅使中国东部的扬子陆块和华北陆块连成—体,也使扬子地台上沉积盖层发生显著变形,并诱导出郯庐断裂等深断裂带的形成。中三叠世末期扬子陆块和华北陆块发生强烈碰撞造山运动,不仅使苏北前陆地区发生显著的冲断褶皱变形,也使扬子陆块由地台型沉积向陆相沉积盆地转变,海水基本退出,发育残余盆地和前陆盆地。

印支运动晚期的陆陆碰撞在燕山期得以延续,并在中侏罗世时期扬子板块与华北板块最终拼合,造山运动也于此时达到高峰,大规模中酸性岩浆侵入与喷发,印支期形成的前陆区地台盖层发生强烈挤压变形并遭受剥蚀。苏北地处两个陆块拼贴的接壤部位,较华北离俯冲带距离更近,最主要的是与华北地台在基底性质上的差异,以软碰硬,壳层形变甚为强烈。燕山运动晚期,由于西太平洋与亚洲大陆发生碰撞,古太平洋消失,新太平洋扩张,此时期下扬子区主要表现为后造山裂陷伸展活动。在苏北盆地中有着重要地位的仪征运动属于燕山运动的尾幕,苏北盆地此时开始形成。

二、中生代构造演化

晚白垩世以来高邮凹陷以陆相断陷—坳陷型盆地为特征,不同时期盆地构造特征有着明显的区别。构造作用控制沉积盆地的形成和演化,盆地的沉积充填样式及构造变形样式又是构造作用的具体表现。

1. 构造演化阶段

晚白垩世—新生代沉积盖层包含有四个主要不整合界面,即:凹陷基底不整合面(上白垩统泰州组和古近系阜宁组与下伏地层之间的不整合面)、戴南组与下伏地层之间的不整合面、三垛组与下伏地层之间的不整合面、新近系盐城组与下伏地层之间的不整合面(王玺等,2013)。前人将形成这四个不整合面的构造运动分别命名为仪征运动、吴堡运动、真武运动和三垛运动。其中真武运动形成的三垛组与下伏戴南组之间的不整合面基本上是平行不整合,只是断陷斜坡上有微角度不整合存在,其他三个不整合面均是明显的角度不整合(表1-1)。

表 1-1 晚白垩世—新生代高邮凹陷构造演化特征简表

地质年代		地层	构造层	盆地结构	沉积充填	构造变形	构造演化期次
第四纪		东台组		拗陷	海陆交互相	主干基底断层继承性活动。少量盖层正断层继承性活动	热拗陷期
新近纪		盐城组			河流、冲积相		
古近纪	渐新世			隆升	三垛运动:断块差异隆升,NE 向弱挤压		
	始新世	三垛组	上构造层	断陷	河流、湖沼相	主干基底断层走滑正断层活动,盖层正断层活动,少量沉积基底卷入正断层继承性活动	非均匀裂陷伸展期
		戴南组			河流、三角洲、湖相		
				隆升	吴堡运动:断块差异升降,近 NS 向引张		
	古新世	阜宁组	下构造层	断拗	河流、湖相	主干基底断层活动,大量沉积基底卷入正断层形成	均匀裂陷伸展期
白垩纪	晚白垩世	泰州组		拗断	河流、湖相	主干基底断层及少量沉积基底卷入正断层活动	
			隆升	仪征运动:整体隆升,NW—SE 向引张			
		赤山组			河流相		

仪征运动可能是苏北盆地一次区域性隆升运动,奠定了苏北晚白垩世—新生代盆地的基础,所形成的盆地基底不整合面在盆地斜坡上表现极其清楚,但是在高邮凹陷内部由于地震资料品质原因并不容易识别这一不整合面。吴堡运动是苏北盆地内最重要的构造运动之一(汪祖智,1993),所形成的 T_3^0 地震反射面在凹陷内分布广泛,特征清晰,可以连续追踪,是戴南组与阜宁组的分界,也是下构造层与上构造层的分界。 T_3^0 地震反射面明显将断裂系统分为上下两套,分别称之为上构造层和下构造层。三垛事件形成的 T_2^0 角度界面代表了高邮凹陷断陷期的结束(刘小平等,2004),盐城期内部断裂活动迅速减弱甚至停止,因此讨论构造演化活动时主要分析其下伏的上、下两套构造层内部演化特征。

凹陷演化的阶段性在盆地沉降史曲线上反映十分明显。泰州组和阜宁组沉积时期,盆地的沉降逐渐加速。阜宁组沉积后盆地发生了区域性的隆起,阜宁组局部遭受剥蚀。由于剥蚀时间短,且盆地抬升幅度较小,造成阜宁组的剥蚀量较少。戴南组和三垛组沉积时期盆地凹陷中心的沉降速率更快,与斜坡、凸起部位差异性增大,柘垛低凸起等正向构造单元上缺失戴南组,断陷的构造格局更加明显。三垛组沉积时期较戴南组沉积时期的沉降速率有所变慢,但总体上还是很快的。渐新世盆地区以隆升为主,存在一定的差异,凹陷北部抬升幅度更大,地层剥蚀量相应也更大。盐城组和东台组沉积时期盆地沉降显著减弱,而且表现为整体沉降特征,

表明盆地沉降由伸展断陷沉降转为热坳陷沉降,沉降速率明显减慢。

2. 构造演化特征

高邮凹陷早期的构造变形特征与整个苏北盆地是统一的,断层活动性不强,对沉积相带的分布控制较弱。在吴堡事件之后,凹陷地壳形变主要表现为边界断层的强烈活动,由于边界断裂的活动性变化,凹陷内部构造演化特征在不同地区及不同时期都有所差异。晚白垩世苏北地区在引张应力场作用下发生伸展变形,伸展方向总体上为 SE—NW 向,由泰州组到阜宁组的沉积过程,是地壳由均匀伸展到非均匀伸展的递进变形过程,凹陷结构由伸展坳陷向伸展拗断、断拗型演化,构造古地理地貌反差总体上较小,凹陷的边界断裂不明显,或对凹陷沉降的控制作用相对较弱。凹陷内部发育了大量的小位移正断层,构成多米诺式正断层和共轭正断层系,代表了本区此时的单向均匀伸展的变形特征。此阶段整个苏北盆地在阜宁组沉积时期可能是一个统一的湖盆,或至少高邮凹陷所处的东台坳陷是一个统一的湖盆,断层对沉积相的控制作用不明显,但对局部地层厚度有一定的控制作用,柘垛低凸起和吴堡低凸起已初步显现。阜宁组沉积晚期,边界断层的活动性明显加强,同时出现同向分支断层,断层上盘逐渐发育深陷带,南部深凹带已经初具规模,表现为由对倾断层组控制的近对称地堑,叠加在区域性拗陷、拗断之上,盆地结构开始向伸展断陷转化。

古新世晚期的吴堡事件是一次伸展隆升性质的构造事件,可能与岩石圈深部热作用有关,而地壳伸展变形由均匀向非均匀转化,既有主干断层的差异隆升,也有在隆升背景上均匀发育的大量小位移正断层,还造成了先存多米诺断块的北翘,并遭受剥蚀,在阜宁组顶部出现削截特征,并在低凸起部位造成阜宁组被剥蚀。吴堡事件所造成的断块升降也为后期断陷型盆地提供了基础。

始新世戴南组沉积时期,高邮凹陷总体上表现为右旋剪切伸展变形,NE 向主干断层的右旋走滑正断层位移加速上盘断陷的发展。边界断层对凹陷内构造变形起到绝对控制作用,上盘地层向边界断层方向倾斜,边界断层上盘开始出现反向调节断层,先存的个别同向断层也发生活动。凹陷的沉降—沉积中心主要集中在边界断层带附近,凹陷现为半地堑、地堑结构,断层对沉积作用具有明显的控制作用。断层带是凹陷的陡坡带,发育一系列近岸水下冲积扇和扇三角洲,缺乏边界断层的构造斜坡是湖盆缓坡带,发育大型(辫状河)三角洲沉积。由于边界的强烈活动,此时在柘垛低凸起之上可能没有沉积戴南组,并且加剧对阜宁组的剥蚀。

三垛组沉积时期,凹陷总体上表现为近南北向伸展变形场特征,凹陷明显继承了戴南组沉积时期的格局。边界断层控制上盘变形,但对沉积相的控制作用减弱。上盘的反向调节断层继续发育,并与同向调节断层组成反“Y”型断层组合。三垛组在全区有广泛分布,表明当时的水体范围可能已经不受断层的控制,但凹陷仍以半地堑结构为主,边界断层继续强烈活动并控制了上盘的变形方式。整个凹陷的基本构造面貌也于此时期基本定型。

始新世末的三垛事件可能是一次区域性的热隆起事件,并有轻微的 NE—SW 向挤压收缩变形,夷平了前期的分隔性断块,全区遭受了强烈的剥蚀,结束了断陷盆地的演化。

新近纪以来,在三垛事件形成的夷平面的基础上,凹陷整体拗陷下沉,充填沉积了盐城组和东台组的冲积平原相地层。区域性的拗陷型沉降是本时期的主要特点。盐城组沉积早期,凹陷内主要断层发生了一定程度的活动,但是强度较小,随后断层活动停止。此阶段凹陷沉降量并不均匀,总体表现为西部沉降幅度小,中东部沉降幅度较大。

3. 构造成因机制

目前,对中国东部箕状断陷形成机制的主流看法是板块俯冲引起地幔物质上拱,再引起壳

层裂陷等一系列连锁反应的结果。但随着资料的积累和认识的深化,马力等(1993)曾指出,苏北盆地的莫霍面深度与新生界沉积厚度呈同相而非镜像倒映关系,经典的裂谷盆地理论无法解释其形成机理。苏北盆地是在复杂且经历强烈变形的基底之上,以燕山期逆冲推覆和剪切断裂为基础,受控于区域拉张兼右旋扭动应力场和挤压应力场交替变化,同时受郯庐断裂限制和影响下形成的复杂断块盆地。

1) 复杂基底结构和强烈基底变形是复杂断块盆地形成的基础

分析表明,苏北晚白垩世—新生代盆地的前身是鲁苏印支—燕山期造山带南侧的晚三叠世—侏罗纪前陆盆地,而前陆盆地前身是扬子陆块东北角的地台盆地。地台基底包括新太古代—古元古代的结晶变质岩和中—新元古代的浅变质岩等两套不同能干性的基底岩系,在区域分布上存在明显的差异。苏北盆地东部、北部存在相对完整的新太古代—古元古代的结晶变质岩,中—新元古代的浅变质岩基底层相对较薄;苏北盆地西部、南部的新太古代—古元古代的结晶变质岩块体破碎而分散,相应地,中—新元古代的浅变质岩基底层相对较厚。地台基底结构的差异导致前陆变形的差异,并一直影响到晚白垩世—新生代盆地结构的差异。因此,复杂的基底结构和强烈的基底变形是苏北盆地复杂断块形成的先天地质基础。

2) 燕山期逆冲推覆构造是后期苏北盆地主干断裂的前身

苏北盆地中的大型基底卷入主干断层对于晚白垩世—古近纪伸展盆地而言属于主干正断层,但是它们多数是由于印支—燕山期区域性逆冲断层面发生反转位移,从断层在盆地基底中位移角度看,也可以定义为反转逆断层,或负反转断层。这些断层向深部延伸多数是在地台基底顶面或结晶—变质基底岩系中拆离滑脱,其主滑脱面甚至可能达到中地壳层中,属于地台基底卷入型断层。苏北盆地中的这类断层多数都是 NEE 或 NE 向走向,向 NNW 或 NW 倾斜,它们向深层延伸可能收敛到主滑脱面上,构成区域尺度甚至地壳尺度的连锁断层系统。这一连锁断层系统主要形成于印支运动、燕山运动中的推覆和收缩变形,在晚白垩世—古近纪时期主要表现为伸展构造变形,并控制了苏北盆地的构造格局的形成和演化。

据地震和钻井资料揭示,新生界断阶带上的古生界基岩地层重复、倒置现象相当普遍。以高邮凹陷南界真武断裂为例,相邻凸起上钻井资料频繁揭示寒武系地层反置于志留系地层之上。研究表明,现今的断阶带帚状断裂系实际是早期的一束逆冲断层。其中,倾角大的逆断层反转后成了盆地边界,倾角小的断层及其夹持的块体实为“推覆前缘三角带”残留原地构成断阶带。燕山期逆冲推覆在苏南主要表现为向北冲,在苏北主要表现为向南冲。相应是,苏北新生界盆地的主断裂均表现为“北西倾”,而苏南句容地区上白垩统残留断陷等均表现为“南东倾”,反映出与早期逆断层的承前启后的联系。

3) 燕山期左行剪切断裂控制着盆地斜坡带复杂断块的形成和发育

燕山期形成的基底断裂系统对晚白垩世—新近纪苏北盆地早期的发生和发展、盆地的构造格架,尤其是对下构造层断裂系统的形成、发展和演化的全过程,起到非常重要的控制作用。盆地基底构造形成时的应力状态主要表现为区域性左行平移的应力状态。在这一应力背景下产生了大量的 NEE 向由北向南逆冲推覆构造的同时,形成了一系列规模不等的 NE 向左行平移断裂,该套基底断层的形成与郯庐断裂带的构造特征和形成时间基本一致。这些早期基底断裂在后期盆地伸展变形中继续活动,为后期复杂断块的形成奠定了基础。在晚白垩世—古近纪时期,苏北地区整体处于近南北向伸展环境之中。郯庐断裂带作为一条区域性深断裂限制了东侧 NE 向断层的伸展变形,导致夹持在郯庐断裂带与苏北盆地南部边界的 NE、NEE 向

断裂带之间的断块体向东北方向逃逸,使 NE、NEE 向断裂产生右旋走滑位移分量。在区域性张应力的作用下,斜坡区 NE 向断层主要沿盆地基底中 NE 向左行平移断层发育。其延伸方向,除大部分沿袭早期断层的方向外,在其尾端处常与 NEE 向断层接结、贯通,由左行平移断层转化为正断层为主,兼有右行平移的断层性质。高邮凹陷以吴堡断裂带、花瓦断裂带、兴化—卸甲庄断裂带及其构造带内部的 NE 向隐蔽性断层均属于此类成因。高邮中东部下构造层中的 NE 断裂旁侧及之间发育了大量规模不等的近 EW 向正断层。这是一种在特殊的应力条件下产生的特殊的断层组合。区域性伸展状态下,夹持在两条 NE 向右行平移正断层之间,并且在南部沉降、北部凸起的地块差异性掀斜背景下,复合形成一套断层群。在区域性 NNW—SSE 向伸展作用下,吴堡断裂带、花瓦断裂带、兴化—卸甲庄斜列断裂带由左行平移断层转化为右行平移正断层。这种应力背景,导致夹持在两条断裂带之间的块体,产生局部近 SN 向的拉张力,使得区内产生大量垂直于张应力、近 EW 向展布的正断层,或在主干断层边界产生大量楔状小型正断层。

4) 晚白垩世以来多期应力场转换是形成复杂断块盆地的动力条件

盆地基底性质和区域应力场状态是影响盆地形成机制的两个主要因素。区域应力场是岩石圈动力学的表现,主要受控于板块边界的板块相互作用、相对运动和板块内部的热活动。中、新生代时期中国东部的区域应力场总体特征发生多次变化,控制区域应力场的主要构造动力来源包括:西太平洋板块对亚洲大陆东部边缘的俯冲作用,印度板块与欧亚板块的碰撞作用,以及郯庐断裂对板块活动的复杂响应。这种复杂多变的区域构造动力使得苏北盆地发生了复杂的构造运动过程。特别是晚白垩世—古近纪以来,太平洋板块和印度洋板块对欧亚大陆板块的不对称俯冲形成的区域构造应力场对苏北盆地断裂系统的演化起着绝对的控制作用。当印度板块的碰撞作用占主导时,在苏北盆地产生近 NS 向的引张应力场,受郯庐断裂的影响同时伴随着右旋扭动,这种扭动作用随距郯庐断裂的距离增加而逐渐减弱,盆内发生裂陷活动;当太平洋板块俯冲作用占主导时,在苏北盆地产生近东西向挤压应力场特征,盆内产生构造隆升。吴堡运动、真武运动以及三垛运动就是两种力源交替作用产生的构造旋回。苏北盆地在晚白垩世至新生代整个演化中,经历了多次右旋张扭—反转挤压的过程。复杂多变的应力场演化过程使得多种成因的构造变形互相叠加,既有继承,又有改造,还有独立,促成了苏北盆地复杂断块的形成。

总的来看,高邮凹陷新生界断裂绝大部分以张性为主,同时伴有右行剪切的特征。剪切作用可在相互垂直的两个方向上产生拉张和挤压分量,垂直拉张分量方向上可产生正断层,在垂直挤压分量方向上可产生压性构造类型如断鼻等。因此,断裂和圈闭可在统一应力背景下同时生成。在右行剪切应力作用下,NEE 向正断层和 NNW 向断鼻无疑是一对孪生兄弟。高邮凹陷断裂的主要走向为 NEE、EW 两个方向,NEE 向断裂—NNW 向断鼻是高邮凹陷斜坡带断裂和圈闭搭配的主要形式,断裂与鼻状构造具有伴生关系并成带分布,体现右行剪切转化来的压性特征。由于断层与断鼻的紧密联系,所以从理论上讲,哪里断层最发育,哪里圈闭也可能最发育。而且,在 NEE、NNW 两个方向上必然存在成排成带现象。

5) 郯庐断裂对复杂断块形成产生了重要影响

苏北盆地西侧的郯庐断裂带是中国东部最著名的一条巨型深断裂带,在苏皖境内长约 550km,是华北板块与扬子板块的分界线。郯庐断裂带的主要形成期也是印支—燕山期,具有区域规模的走滑活动特征。在晚白垩世—古近纪有明显的地幔热活动,并造成断裂带的伸展、右旋走滑伸展构造变形,受它的影响苏北盆地内的断裂活动表现为西强东弱,新近纪开始转为挤压。