

# 渤海湾盆地新生代构造变形机制： 物理模拟和讨论<sup>\*</sup>

周建勋<sup>①\*\*</sup> 周建生<sup>②</sup>

① 中国石油大学(北京)教育部石油天然气成藏机理重点实验室和地球科学系, 北京 102249;

② 中国石油大港油田分公司, 天津 300280)

**摘要** 渤海湾盆地是中国东北部新生代含油气盆地, 并与欧亚板块东缘一些中-新生代盆地之间存在着显著的几何学与运动学相似性, 但其形成机制至今仍存很大争议. 作者以位于渤海湾盆地中部的黄骅拗陷为原形, 设计了 4 组不同伸展方向的平面砂箱模型. 实验结果表明, 只有南-北向伸展模型与实际构造之间具有良好的相似性, 同时这一模型表明裂陷盆地中断层走向的复杂变化并不一定就是复杂运动学机制或多期变形的结果. 通过实验结果与实际构造的对比分析, 以及根据黄骅拗陷与渤海湾盆地之间高度的构造相似性特征, 作者提出: 渤海湾盆地是由南-北向伸展作用而形成, 盆地北北东向边界断裂的走滑变形是南-北向伸展作用的结果, 在南-北向伸展过程中起侧向转换作用. 同时根据渤海湾盆地与欧亚板块东缘一些中-新生代盆地之间显著的几何学与运动学相似性, 研究认为: (1) “南-北向伸展模式”可为渤海湾盆地以及欧亚板块东缘一些相邻盆地的形成提供较好的运动学机制解释; (2) 南-北向伸展作用可能是太平洋-库拉板块之间近东-西向扩张洋脊俯冲所形成的“板片窗”的效应. 这一“板片窗”效应同时可以合理解释欧亚板块东缘盆地初始裂陷时代自东向西逐渐变新的趋势以及盆地从裂陷逐渐转化为热沉降状态的现象.

**关键词** 渤海湾盆地 物理模拟 新生代 伸展构造

渤海湾盆地是位于中国东北部的新生代含油气盆地(图 1(a)), 并与欧亚板块东缘一些中-新生代伸展盆地之间存在着明显的几何学与运动学相似性<sup>[1,2]</sup>. 经数十年石油勘探, 已对该盆地的构造特征和新生

代地层分布有很好的了解. 研究表明, 渤海湾盆地是一个典型的伸展盆地, 存在早第三纪裂陷和晚第三纪以来热沉降两个构造演化阶段<sup>[2~5]</sup>. 然而, 对该盆地的构造变形机制仍有争议, 存在各种不同的运动

收稿日期: 2005-01-10; 接受日期: 2005-07-13

\* 中国石油天然气集团创新基金资助项目(批准号: CX1999-06)

\*\* E-mail: [jxzhou@bjpeu.edu.cn](mailto:jxzhou@bjpeu.edu.cn)

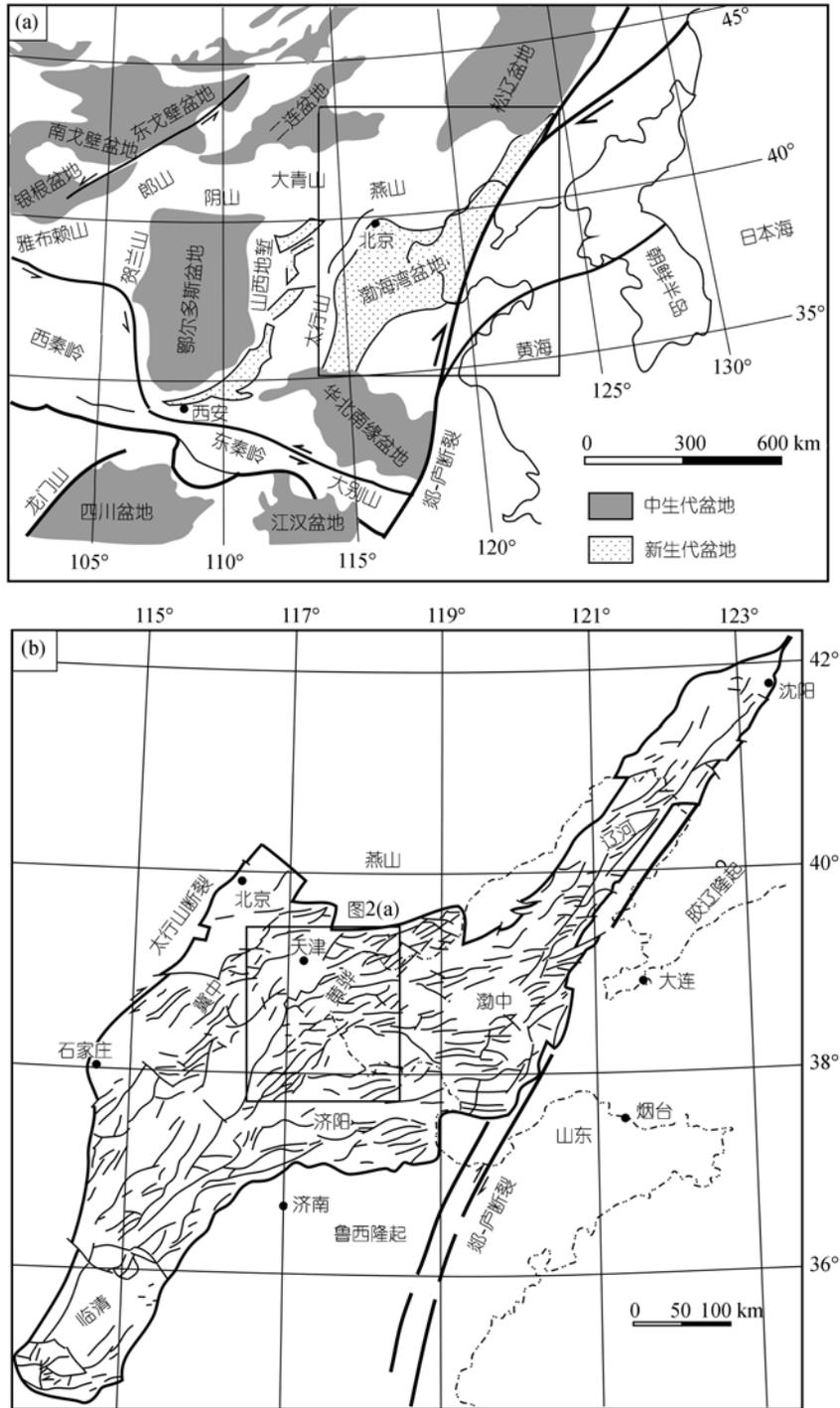


图 1

(a) 渤海湾盆地区域构造格架图(据孟庆任 2003<sup>[4]</sup>修改); (b) 渤海湾盆地地下第三系中断层分布图(基于下第三系顶面构造图编制)

学模式和动力学成因观点<sup>[6-8]</sup>。深入研究渤海湾盆地新生代构造变形机制, 不仅对进一步揭示该盆地构造展布规律和油气勘探具有重要意义, 并可为欧亚板块东缘相邻盆地的形成机制提供启示。

构造物理模拟是探讨构造形成机制的有效方法, 已被广泛用于各类构造研究, 并为裂陷和拉分盆地的形成机制提供了许多新的启示(例如, McClay和White<sup>[9]</sup>; Dooley和McClay<sup>[10]</sup>; Chemenda等人<sup>[11]</sup>)。已经很好证明, 裂陷或拉分盆地的断层走向和组合关系主要受伸展方向和盆地边界几何形态的控制<sup>[9-13]</sup>。为探讨渤海湾盆地新生代构造变形机制, 作者以渤海湾盆地中部的黄骅坳陷为原形, 设计了4组不同伸展方向的平面砂箱实验模型。根据实验结果与实际构造的对比, 提出渤海湾盆地“南-北向伸展”的运动学模式, 并对渤海湾盆地、以及欧亚板块东缘相邻伸展盆地的动力学成因进行讨论。

## 1 地质背景

渤海湾盆地总体北北东向展布, 呈“狗腿”状轮廓<sup>[6]</sup>, 中部呈菱形, 北东和南西两端呈窄的裂陷带(图1(b))。该盆地经历了早第三纪的裂陷和晚第三纪以来的热沉降两个主要构造演化阶段<sup>[2-5]</sup>, 由辽河、冀中、黄骅、渤中、济阳和临清等6个次级坳陷组成(图1b), 构造面貌复杂, 断层走向多变。盆地中东部断层以近东-西走向为主, 其余部位则以北北东向为主。此外, 盆地各处普遍分布一些延伸较短的近东-西向雁列断层<sup>[2,6]</sup>。次级坳陷之间、以及次级坳陷与整个渤海湾盆地之间存在显著的构造相似性, 即具有类似的构造样式和运动学特征<sup>[14,15]</sup>。这种构造相似性现象在欧亚板块东缘盆地之间也普遍存在<sup>[11]</sup>。

黄骅坳陷位于渤海湾盆地中部(图1(b)), 总体走向北北东向, 其两侧分别被沧县隆起和埕宁隆起所限(图2(a))。坳陷西南半部, 断层走向以北北东为主、且大致平行边界方向, 并有延伸较短的近东-西向雁列断层分布。坳陷东北半部南侧, 断层走向在海岸线以西为北东向, 至海岸线以东转为近东-西向。坳陷东北半部北侧, 断层走向以北东向为主, 但有一些北西西和近东-西向断层(图2(a))。地震剖面(图2(b))显

示早第三纪裂陷和晚第三纪热沉降的变形特点, 断层的活动多数具有连续性、并一直延伸至第四系顶部, 只是进入上第三系后断层活动性减弱、断距变小。对比图1(b)和图2(a)可见, 黄骅坳陷的构造格局和断层组合样式相对于整个渤海湾盆地具有很好的相似性, 几乎是渤海湾盆地南半部的缩影。

渤海湾盆地复杂的构造面貌容易使人把它与复杂的形成机制相联系, 于是提出了各种不同的运动学机制和动力学成因解释。目前主要的运动学模式有三种(图3): (1) 北西西-南东东向伸展模式<sup>[3,4,6,16-18]</sup>, (2) 走滑拉分模式<sup>[19,20]</sup>; (3) 北西西-南东东向伸展叠加北北东向右行走滑模式<sup>[5,21-23]</sup>(又称张扭模式<sup>[6,21]</sup>)。有关动力学成因也有三种不同的解释: ①印度-欧亚板块碰撞的远程效应<sup>[24-27]</sup>; ②太平洋板块俯冲的结果<sup>[6,28,29]</sup>; ③上述两者共同作用的结果<sup>[18,30]</sup>。

## 2 模型设计

### 2.1 设计思路

裂陷盆地的构造特征主要取决于盆地两侧块体的分离方向(即伸展方向)和盆地边界的几何形态<sup>[9,11,12]</sup>。其实, 渤海湾盆地现有的三种运动学模式的差异主要集中在对伸展方向的不同认识: “北西西-南东东向伸展模式”认为北西西-南东东向伸展(图3(a)), “走滑拉分模式”认为北北东-南南西向伸展(图3(b)); 而“北西西-南东东向伸展叠加北北东向右行走滑模式”则意味着伸展方向介于以上两者之间, 即北西西-南东东向伸展与北北东向右行走滑的叠加运动方向(图3(c))。总之, 这些不同的运动学模式表明该盆地的伸展方向应处于北西西-南东东与北北东-南南西这一方向区间之内。

由于渤海湾盆地的构造格局与一些典型拉分盆地的物理模拟实验结果<sup>[10,13]</sup>有着显著的差异, 故在模型设计中不考虑北北东-南南西方向的伸展。同时, 一些物理模拟实验结果<sup>[9,31]</sup>显示裂陷盆地内部的断层走向近于垂直伸展方向, 主要反映裂陷的伸展方向, 故渤海湾盆中东部的近东-西向断层以及遍布全盆地的延伸较短的近东-西向雁列断层可能表明该盆地的伸展方向为近南-北向。因此, 在模型的伸展方向设

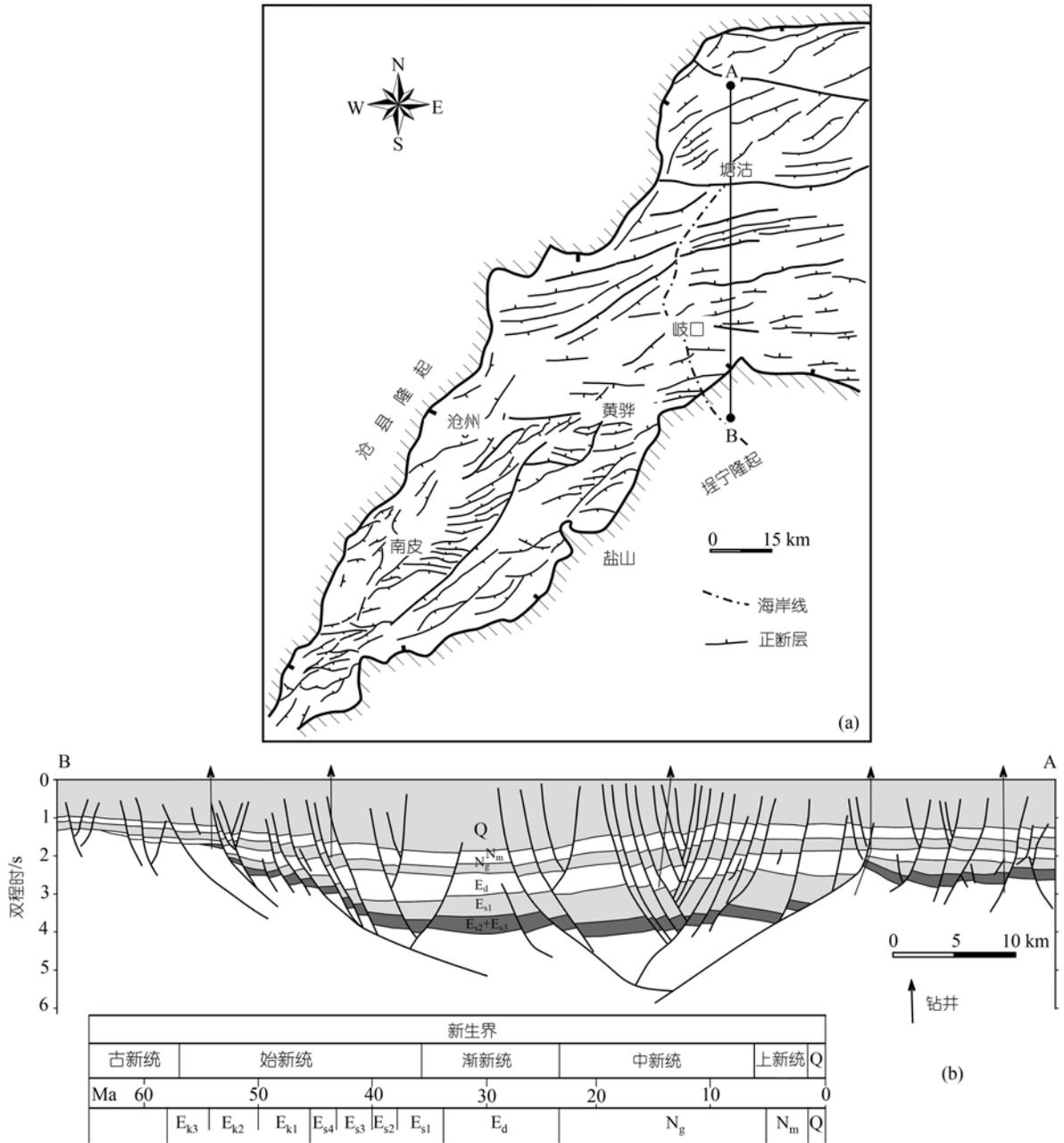


图 2 (a) 黄骅坳陷下第三系断层平面分布图; (b) 黄骅坳陷地震剖面解释图

计方面主要考虑在南-北向与北西-南东向区间之内。共设计了 4 组不同伸展方向的模型, 包括: 南-北向伸展、353°~173°向伸展、330°~150°向伸展和 315°~135°向伸展模型。同时, 为简化模型设计和便于实验与实

际的详细对比, 模型边界几何形态的设计以黄骅坳陷为原形。这些模型的边界与实验条件基本一致, 以便实验结果的直接对比。由于黄骅坳陷与渤海湾盆地具有高度的构造相似性, 这些模型的实验结果可

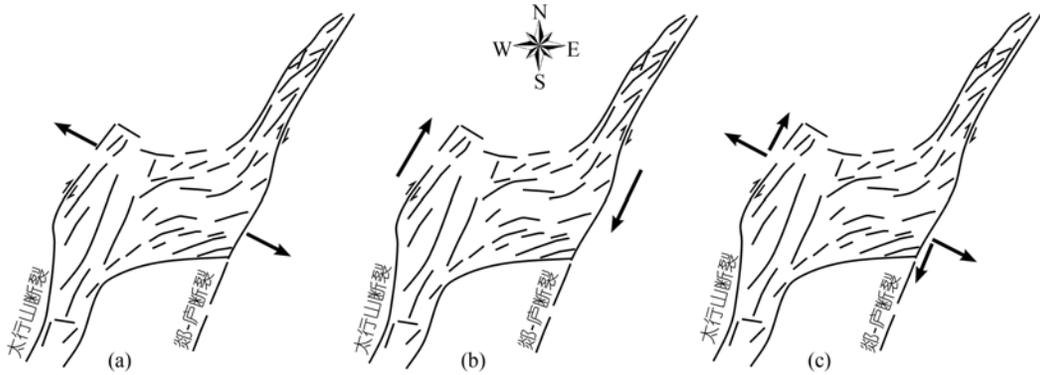


图 3 渤海湾盆地新生代构造主要运动学机制模式  
(a) 北西西-南东东向伸展模式; (b) 走滑-拉分模式; (c) 北西西-南东东向伸展叠加北北东向右行走滑模式

用于对整个渤海湾盆地的构造解释。

### 2.2 模型装置

松散石英砂已被证明是模拟地壳浅部脆性变形的理想材料<sup>[13]</sup>, 并被广泛用于盆地构造研究<sup>[9,32]</sup>, 故实验模型以松散石英为材料。模型的边界形态及实际范围根据下第三系黄骅坳陷形态按比例缩小(图 4(a))。模型在坳陷区底部以可拉伸的橡皮作为变形传递介质, 并与隆起区底部的无伸缩棉布连接, 两端分别连接在活动挡板和固定挡板的底端。在隆起区域的棉布上放置聚苯塑料块, 然后铺设砂层(图 4(b))。随着马

达驱动活动挡板向外移动, 坳陷区底部橡皮被逐渐拉伸, 在其上的砂层中产生正断层并形成裂隙。

模型宽度均为 40 cm, 砂层厚度 5 cm。因实际范围差异, 模型的比例尺有所不同, 其中南-北向和 353°~173°向伸展模型约 1:27 万, 330°~150°向和 315°~135°向伸展模型约 1:33 万。所用石英砂粒径 0.3~0.4 mm, 内摩擦角 31°~32°, 经染色处理。伸展位移 5 cm, 位移速率  $2.58 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ cm}$ 。所用实验装置与 McClay 和 White<sup>[9]</sup> 的装置类似。所有模型均进行了 2 次以上的重复实验、并得到相似的结果。

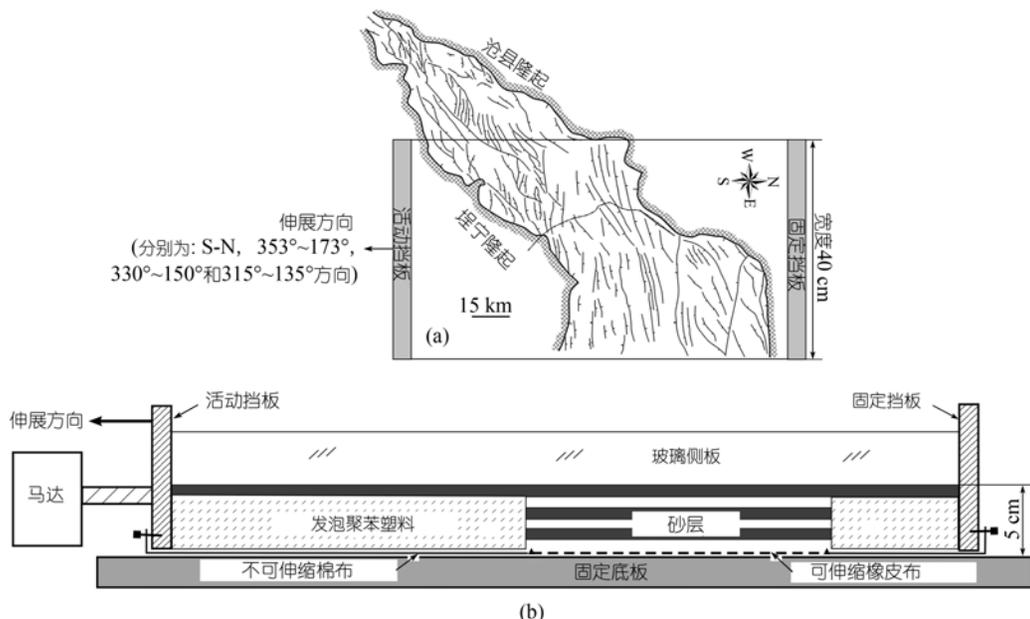


图 4 实验模型装置图  
(a) 实验模型平面结构示意图, 指示伸展方向、边界形态; (b) 模型剖面结构示意图

### 3 实验结果

#### 3.1 南-北向伸展模型

伸展量为 2 cm 时(图 5(a)), 断层主要分布在边界附近. 裂隙西部断层为北东向并呈雁列展布. 裂隙东部断层为近东-西向. 裂隙南缘断层走向随着边界方向变化, 从北东向变为近东-西向. 伸展量为 3 cm 时(图 5(b)), 断层逐渐向裂隙内部发展. 伸展量 4 cm 时(图 5(c)), 裂隙西部雁列断层更加发育, 而裂隙东部南侧断层仍以近东-西向为主. 裂隙东部北侧断层则以北东向为主, 并见北西西向断层的雏形. 在裂隙南缘断层走向随边界方向变化的现象更加明显. 伸展量为 5 cm 时(图 5(d)), 构造总体格局不变, 只是裂隙西部的近东-西向雁列断层和裂隙东部的北西西向断层更加显著.

#### 3.2 353°~173°向伸展模型

伸展量为 2 cm 时(图 6(a)), 裂隙西部最先形成与伸展方向呈约 80°交角的北东东向断层. 伸展量为 3 cm 时(图 6(b)), 断层分别向南部和东部扩展, 且在裂隙南侧边界附近分布较为密集. 裂隙西部断层呈北东东向雁列展布, 裂隙东部断层主要为近东-西走向, 即与伸展方向近于垂直. 裂隙南缘断层走向也随着边界方向变化. 伸展量为 5 cm 时(图 6(c), (d)), 断层进一步发育, 但总体构造格局不变. 裂隙西部断层仍主要呈北东东雁列展布, 但局部见近东-西向雁列断层. 裂隙东部断层仍主要呈近东-西向. 裂隙南缘断层走向随边界方向变化现象更加显著.

#### 3.3 330°~150°向伸展模型

伸展量为 1 cm 时(图 7(a)), 断层首先出现在裂隙

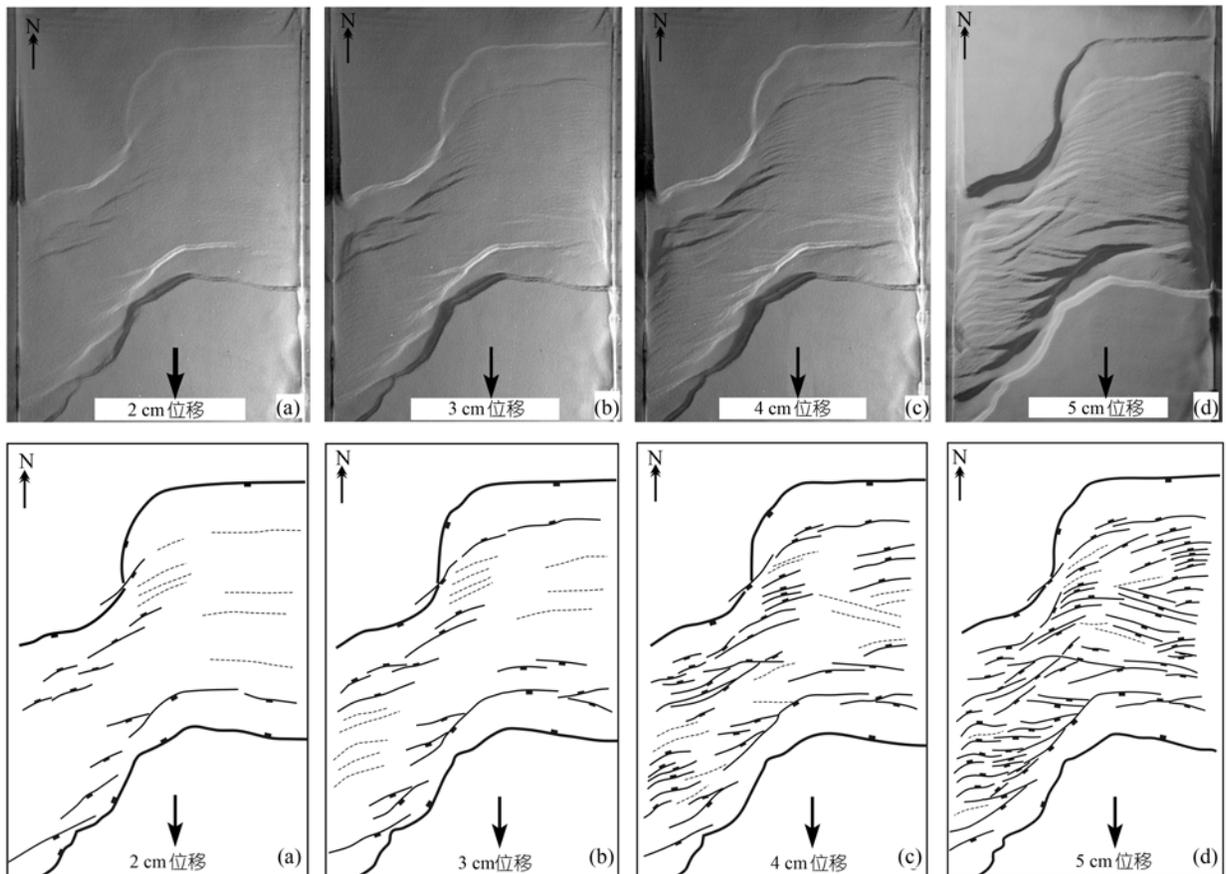


图 5 南-北向伸展模型系列顶面照片和对应的断层解释图  
伸展量分别为 2, 3, 4 和 5 cm 其中照片(d)具有方向相反的光照

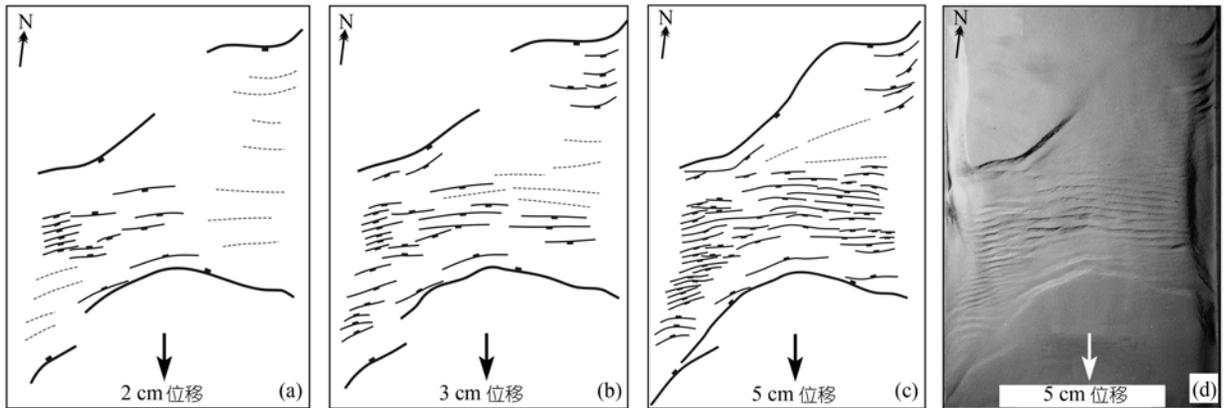


图6

(a)~(c)353°~173°向伸展模型系列顶面断层解释图, 伸展量分别为2, 3和5 cm; (d) 伸展量5 cm时的顶面照片

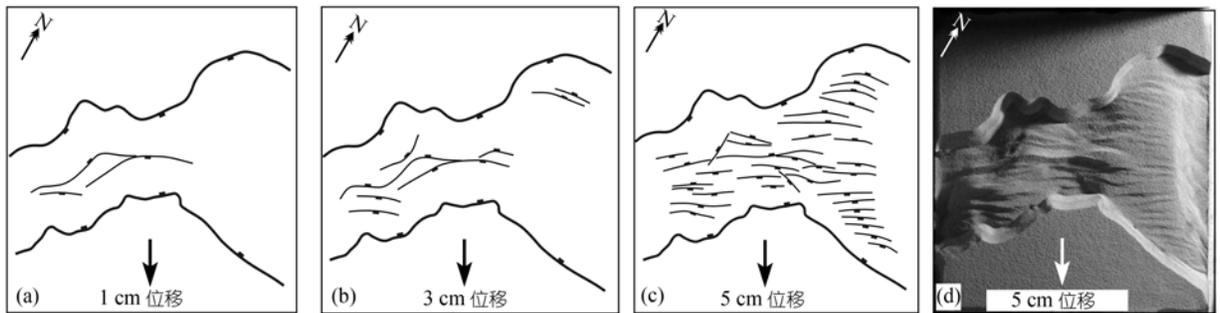


图7

(a)~(c)330°~150°向伸展模型系列顶面断层解释图, 伸展量分别为1, 3和5 cm; (d) 伸展量5 cm时的顶面照片

西部, 其走向虽受边界形态影响有所波动, 但基本垂直伸展方向. 伸展量为3 cm时(图7(b)), 断层向两侧扩展, 其走向受边界形态影响仍比较明显. 伸展量为5 cm时(图7(c), (d)), 断层走向除了在局部还受边界形态影响外, 多数断层走向约为 $60^\circ$ , 即与伸展方向基本垂直. 裂隙南缘未见断层走向随边界方向变化现象.

### 3.4 315°~135°向伸展模型

伸展量为1 cm时(图8(a)), 断层最先出现在裂隙西部, 虽受边界形态影响略有弯曲, 但总体走向约 $45^\circ$ , 与伸展方向垂直. 伸展量为3 cm时(图8(b)), 断层向两侧扩展, 但走向变化不大. 伸展量为5 cm时(图8(c), (d)), 除局部区域外, 多数断层走向约 $45^\circ$ , 与伸展方向保持垂直. 裂隙南缘也未见断层走向随

边界方向变化现象.

## 4 讨论

### 4.1 实验结果与实际构造对比

与黄骅坳陷的实际构造特征对比, 上述4个模型中以南-北向伸展模型具有最好的相似性(图9(a)). 该模型较好地重现了以下5方面的实际构造现象: ① 歧口两侧断层转折现象, 且断层走向和转折幅度均很接近(对比图9(a)-1和(e)-1); ② 埕宁隆起北侧的近东-西向断层(对比图9(a)-2和(e)-2); ③ 黄骅附近的近东-西向雁列断层(对比图9(a)-3和9(e)-3); ④ 塘沽以北的北东向断层(对比图9(a)-4和(e)-4); ⑤ 坳陷西部北缘的北东东向断层(对比图9(a)-5和(e)-5). 该模型同时表明, 在边界几何条件比较复杂情况下, 同一方向的伸展作用可以形成不同走向的断层, 断层走

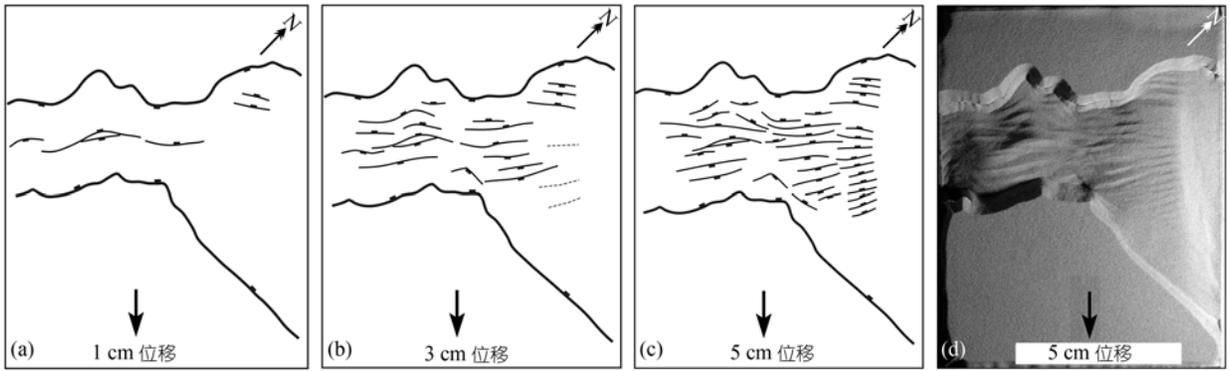


图 8

(a)~(c)315°~135°向伸展模型系列顶面断层解释图, 伸展量分别为 1, 3 和 5 cm; (d) 伸展量 5 cm 时的顶面照片

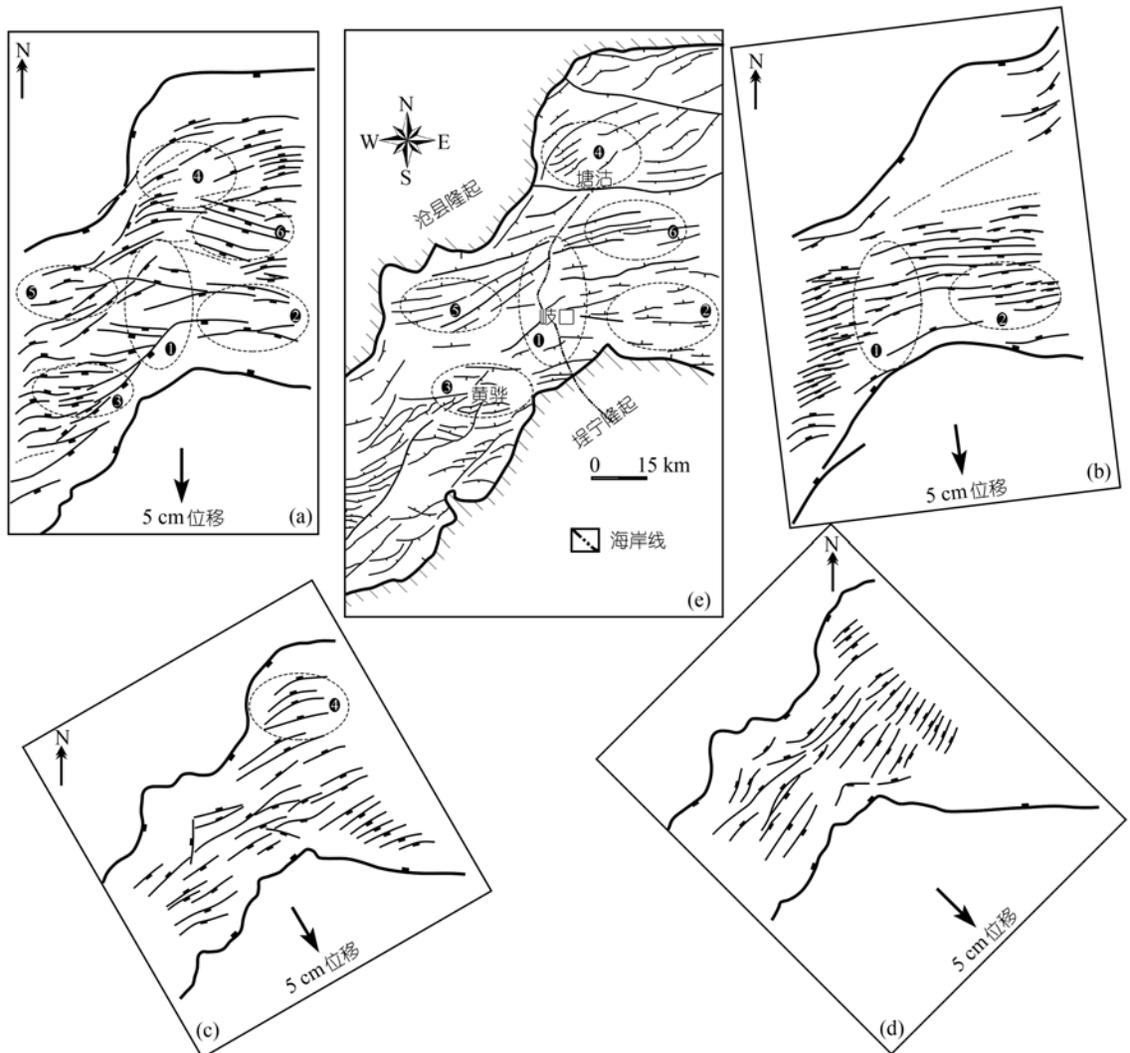


图 9 实验模型与黄骅拗陷实际构造的对比

伸展量 5 cm. (a) 南-北向伸展模型; (b) 353°~173°伸展模型; (c) 330°~150°伸展模型; (d) 315°~135°伸展模型; (e) 黄骅拗陷实际构造格局

向的复杂变化并不一定就是复杂的运动学机制或多期变形的结果. 该模型后期阶段出现的北西西向断层在黄骅拗陷中虽有显示, 但具体位置有些差异(对比图 9(a)和(e)). 北西西向断层在渤海湾盆地的北东和南西部位也可见到(图 1(b)), 它们曾被解释为变形转换带<sup>[4,6]</sup>. 由于该模型中的北西西向断层不属变形转换带, 因此存在于渤海湾盆地北东和南西部位的北西西向断层也并不一定属于变形转换带, 有可能只是属于走向不同的伸展断层.

虽然  $353^{\circ}\sim 173^{\circ}$  向伸展模型的伸展方向与南-北向伸展模型仅有  $7^{\circ}$  之差, 但与实际构造的相似性急剧降低, 只粗略重现了 2 方面的实际构造现象, 即: ①歧口两侧断层转折现象, 但断层走向和转折幅度存在较大的差异(对比图 9(b)-1 和(e)-1); ②埕宁隆起以北的近东-西向断层(对比图 9(b)-2 和(e)-2). 除此之外, 该模型与实际构造现象无更多的相似性.

在  $330^{\circ}\sim 150^{\circ}$  向伸展模型和  $315^{\circ}\sim 135^{\circ}$  向伸展模型中, 除  $330^{\circ}\sim 150^{\circ}$  向伸展模型在塘沽以北的局部地区具有相似性外(对比图 9(c)-4 和(e)-4), 它们与实际构造现象不存在相似性(对比图 9(c), (d)与(e)). 另外, 这两个模型在伸展量较小时变形面貌与实际构造也无相似性(对比图 7(a)和(b)、8(a)和(b)与 9(e)), 这表明伸展量的大小不是造成相似性缺乏的原因.

## 4.2 运动学机制

目前, 虽然对渤海湾盆地构造的运动学机制已提出了三种主要的模式(图 3), 但它们均存在缺陷. “北西西-南东东向伸展模式”(图 3(a))虽然可从 Anderson 正断层成因模式角度解释北北东-南南西向的盆地轮廓和北北东-南南西向断层的形成, 但难以解释近东-西向正断层的形成、以及盆地中部与其两端在北北西-南东东方向上巨的大宽度差异. “走滑拉分模式”(图 3(b))虽然可以解释盆地中部近东-西向断层的形成, 但盆地整体构造格局与经典的拉分盆地模式以及相应的实验结果之间存在显著差距<sup>[6,10,13]</sup>, 并且其西侧边界的太行山前断裂的走滑分量很小<sup>[33]</sup>, 而东侧郯庐断裂新生代期间的右行走滑量也十分有限<sup>[34]</sup>, 虽它在早白垩世发生过大规模的左行走滑<sup>[35]</sup>. 它们的右行走滑拉分作用不足于形成如同渤海湾盆

地的大规模拉分盆地. “北西西-南东东向伸展叠加北北东向右行走滑模式”(图 3(c))虽然可以克服前两个模式的不足, 但不能明确说明两个运动分量的相对大小, 并存在动力学成因解释方面的困难(详见以下讨论).

$330^{\circ}\sim 150^{\circ}$  向伸展模型和  $315^{\circ}\sim 135^{\circ}$  向伸展模型与实际构造现象基本不具相似性, 表明黄骅拗陷不可能是北西西-南东东伸展的产物. 而南-北向伸展模型与实际构造现象之间良好的相似性, 表明黄骅拗陷是近南-北向伸展作用的结果. 同时, 根据黄骅拗陷与渤海湾盆地之间高度的构造相似性, 笔者进一步认为渤海湾盆地是在近南-北向伸展作用下形成的新生代裂陷. 早第三纪和晚第三纪以来这两个构造阶段的运动学体制并未发生实质性的变化, 只是晚第三纪以来伸展强度显著减弱, 从而表现为热沉降的变形特点. 另外, 欧亚板块东缘一些具构造相似性的盆地也可用“南-北向伸展”的运动学模式进行较好地解释(图 10). 欧亚板块东缘中生代时期形成的北东和近东-西向地壳强度薄弱带, 是导致渤海湾盆地以及欧亚板块东缘多数盆地具有“懒Z”(lazy-Z)形边界和菱形轮廓的原因<sup>[1,6]</sup>. 从运动学角度分析, 走向与伸展方向不垂直的正断层均具有走滑分量, 所以南-北向伸展必定在盆地北北东向边界断层(如西侧的太行山前断裂和东侧郯庐断裂)上产生明显的右行走滑变形. 因此, 笔者认为这些边界断层上的右行走滑变形很可能是伸展作用的结果, 在南-北向伸展过程中起侧向转换作用.

根据运动学分解原则, 南-北向伸展也可分解为北西西-南东东向伸展和北北东向右行走滑两个运动分量, 在这点上“南-北向伸展模式”与“北西西-南东东向伸展叠加北北东向右行走滑模式”或“张扭模式”具有运动学相似性, 但“南-北向伸展模式”的运动学解释更加简洁明确. 其一, “北西西-南东东向伸展叠加北北东向右行走滑模式”没有明确说明这两个运动分量的相对大小, 故虽然可知伸展方向(即合运动方向)可能处于北西西-南东东向与北北东向之间但无法具体确定, 而“南-北向伸展模式”给出了具体的伸展方向. 其二, “北西西-南东东向伸展叠加北北东向右行走滑模式”把北北东向右行走滑运动作为引起盆地

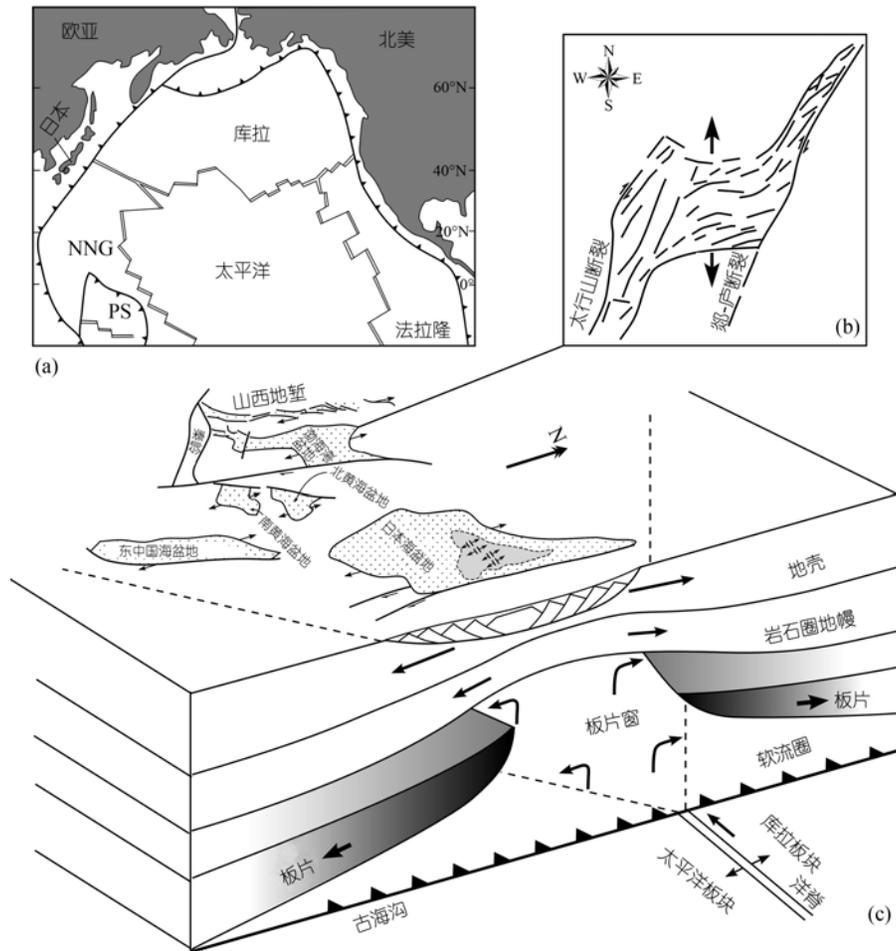


图 10

(a) 重建的 50 Ma 前的太平洋盆地 (据 Osozawa<sup>[45]</sup>), 指示太平洋、库拉以及北新几内亚板块之间扩张洋脊的分布; PS=菲律宾海板块, NNG=北新几内亚板块, 带锯齿的线=海沟; (b) 渤海湾盆地新生代构造“南-北向伸展”运动学模式示意图; (c) 欧亚板块东缘包括渤海湾盆地在内的一些南-北向伸展盆地动力学成因的三维示意图, 板片窗剖面根据 Kinoshita<sup>[42]</sup> 修改, 盆地轮廓参照 Ren 等<sup>[18]</sup>

伸展作用的原因之一<sup>[2,6,21]</sup>, 而在“南-北向伸展模式”中认为它是盆地南-北向伸展作用的结果. 事实上, 不少学者曾经注意到渤海湾盆地、甚至欧亚板块东缘一些盆地具有近南-北向伸展的运动学特征<sup>[1,2,6,20,21,25]</sup>, 但却给予各种不同的运动学机制和动力学成因解释.

### 4.3 动力学成因

有关渤海湾及欧亚板块东缘伸展盆地的动力来源, 人们通常将其归因为印度-欧亚板块碰撞的远程效应<sup>[24-27]</sup>或太平洋-欧亚板块的汇聚作用<sup>[6,28,29]</sup>, 或两者的共同效应<sup>[18,30]</sup>. 然而, 由于欧亚板块东缘盆地初始裂陷时代明显早于印度-欧亚板块碰撞时代, 所以

印度-欧亚板块碰撞远程效应的解释受到质疑<sup>[6,29]</sup>. 另外, 在印度-欧亚板块碰撞远程效应最为强烈的第四纪时期<sup>[36]</sup>, 渤海湾及其周围盆地却处于微弱伸展的热沉降状态<sup>[2,18]</sup>, 这一实事也与印度-欧亚板块碰撞远程效应的解释相矛盾. 此外, 欧亚板块东缘盆地初始裂陷时代自东向西逐渐变新的趋势<sup>[2,7]</sup>也难以用印度-欧亚板块碰撞远程效应解释. 故应从太平洋-欧亚板块汇聚作用中寻找主要动力学来源.

有关太平洋-欧亚板块汇聚作用引起欧亚东缘伸展作用的机制目前仍存在不同的认识. 俯冲退离 (Subduction roll back) 机制只能解释“北西西-南东东向伸展模式”和“北西西-南东东向伸展叠加北北东向右

行走滑模式”中的北西西-南东东向伸展作用<sup>[6,18,21,28,37]</sup>. 太平洋-欧亚板块斜向会聚作用虽然可以解释“北西西-南东东向伸展叠加北北东向右行走滑模式”和“走滑拉分模式”中北北东向右行走滑运动的成因<sup>[6,21]</sup>, 但 $\sim 60^\circ$ 的斜向会聚角度在产生这一右行走滑分量的同时会产生更大的北西西-南东东向挤压分量. 这种挤压分量会阻碍北西西-南东东向的伸展作用, 甚至形成北北东向的挤压构造. 然而, 事实并非如此. Northrup和Royden<sup>[29]</sup>提出伸展作用与太平洋-欧亚板块会聚速率的下降有关, 但未对其机制加以解释. 总之, 目前所提出的各种机制不能很好解释有关南-北向伸展和北北东向右行走滑的动力学成因问题.

“板片窗”(slab window)效应<sup>[38]</sup>或许也可为欧亚板块东缘的伸展作用提供较为合理的动力学成因解释. 研究表明, 扩张洋脊俯冲形成的板片窗效应在仰冲板块边缘不仅可以引发岩浆活动和构造效应<sup>[39-44]</sup>, 而且可导致伸展变形、和在仰冲板块边缘形成裂陷盆地<sup>[38,44]</sup>. 古板块重建表明, 太平洋与库拉板块之间存在近东-西向的扩张洋脊(图 10(a)), 并于晚中生代以来随着约 5000 km 的大洋板块逐渐俯冲至欧亚板块之下<sup>[40-42,45,46]</sup>. Kinoshita<sup>[41,42]</sup>提出, 广泛分布在亚洲板块东缘, 从广西至俄罗斯东部之间约 8000 km 范围内的一系列晚中生代-早新生代的花岗岩浆作用, 可能与这一近东-西向扩张洋脊俯冲形成的板片窗效应有关. 根据板片窗的形成原理<sup>[38]</sup>, 太平洋与库拉板块之间近东-西走向扩张洋脊的俯冲可在欧亚板块东缘岩石圈中产生近南-北向的伸展效应. 因此, 笔者认为这一伸展效应为渤海湾、及欧亚板块东缘盆地的南-北向伸展提供了动力学来源(图 10(b)). 另外, 欧亚板块东缘盆地初始裂陷时代自东向西逐渐变新的趋势<sup>[2,7]</sup>也与板片窗效应自东向西扩展的方向相符合, 同时渤海湾及其周围盆地从裂陷逐渐转化为热沉降状态的现象也可用板片窗效应的逐渐衰减加以合理解释. 而太平洋与北新几内亚板块之间北西西走向的扩张洋脊(图 10(a))俯冲产生的板片窗效应可能控制了欧亚板块东南缘伸展盆地的形成.

## 5 结论

根据上述不同伸展方向模型的实验结果与实际

构造的对比分析、以及黄骅坳陷与渤海湾盆地之间高度的构造相似性特征, 得到以下结论:

(1) 南-北向伸展模型的实验结果显示与实际构造之间具有良好的相似性, 该模型同时表明了边界几何条件比较复杂情况下, 同一方向的伸展作用可以形成不同走向的断层, 因此断层走向的复杂变化并不一定就是复杂运动学机制或多期变形的结果.

(2)  $353^\circ\sim 173^\circ$ 向伸展模型的相似程度很低, 而  $330^\circ\sim 150^\circ$ 向伸展模型和  $315^\circ\sim 135^\circ$ 向伸展模型与实际构造之间基本不具相似性, 同时这些模型的结果显示伸展量的大小不是造成相似性缺乏的原因, 由此表明了渤海湾盆地不可能是北西西-南东东伸展作用的产物. 而南-北向伸展模型与黄骅坳陷实际构造之间良好的相似性现象则表明了渤海湾盆地是由近南-北向伸展作用而形成.

(3) “南-北向伸展模式”可为渤海湾盆地以及欧亚板块东缘一些具构造相似性的盆地提供较好的运动学解释, 盆地北北东向边界断裂的走滑变形是南-北向伸展作用的结果, 在南-北向伸展过程中起侧向转换作用, 而不是引起伸展作用的原因.

(4) 太平洋-库拉板块之间近东-西向扩张洋脊俯冲产生的板片窗效应不仅可以解释渤海湾盆地以及欧亚板块东缘盆地南-北向伸展的动力学成因, 而且可以合理解释欧亚板块东缘盆地初始裂陷时代自东向西逐渐变新的趋势以及盆地从裂陷逐渐转化为热沉降状态的现象.

(5) 虽然“南-北向伸展模式”与“北西西-南东东向伸展叠加北北东向右行走滑模式”或“张扭模式”存在运动学方面的相似性, 但“南-北向伸展模式”可为渤海湾盆地提供较为简洁合理的运动学机制和动力学成因解释.

**致谢** 实验员朱玉军和研究生魏春光参加了部分实验工作; 对孟庆任和陈彦韶博士的有益建议及审稿专家提出的宝贵意见, 特致谢意.

## 参 考 文 献

- 1 许浚远. 东亚陆缘新生代盆地的相似性. 石油实验地质, 1997, 19(4): 297-304
- 2 Allen M, Macdonald D, Zhao X, et al. Early Cenozoic two-phase

- extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(7~8): 951–972[DOI]
- 3 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. *地质学报*, 1983, 57(1): 22–32
  - 4 陆克政, 漆家福, 戴俊生, 等. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式. 北京: 地质出版社, 1997. 87–125
  - 5 Ye H, Shedlock K, Hellinger S, et al. The North China Basin: an example of a Cenozoic rifted interplate basin. *Tectonics*, 1985, 4(2): 153–169
  - 6 Allen M, Macdonald D, Zhao X, et al. Transtensional deformation in the evolution of the Bohai Basin, northern China. In: Holdsworth R, Strachan R, Dewey J, eds. *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics*. Geological Society Special Publications, 1998, 135: 215–229
  - 7 许浚远, 张凌云. 西北太平洋边缘新生代盆地成因(上). 成盆机制述评. *石油与天然气地质*, 2000, 21(2): 93–98
  - 8 Meng Q. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 2003, 369(3~4): 155–174[DOI]
  - 9 McClay K, White M. Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting. *Mar Petrol Geol*, 1995, 12(2): 137–151[DOI]
  - 10 Dooley T, McClay K. Analog modeling of pull-apart basins. *AAPG Bull*, 1997, 81(11): 1804–1826
  - 11 Chemenda A, Deverchere J, Calais E. Three-dimensional laboratory modelling of rifting: application to the Baikal Rift, Russia. *Tectonophysics*, 2002, 356(4): 253–273[DOI]
  - 12 Mart Y, Dauteuil O. Analogue experiments of propagation of oblique rifts. *Tectonophysics*, 2000, 316(1~2): 121–132[DOI]
  - 13 McClay K, Bonora M. Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *AAPG Bull*, 2001, 85(2): 233–260
  - 14 Nabelek J, Chen W, Ye H. The Tangshan earthquake sequence and its implications for the evolution of the North China Basin. *J Geophys Res*, 1987, 92(12): 12615–12628
  - 15 许浚远, 张凌云, 杨东胜, 等. 歧口凹陷构造演化. *石油实验地质*, 1996, 18(4): 348–355
  - 16 Hu J, Xu S, Tong X, et al. The Bohai Bay Basin. Zhu X. *Chinese Sedimentary Basin*. Amsterdam: Elsevier, 1989. 89–105
  - 17 孟庆任, 王战, 王翔, 等. 新生代黄骅坳陷伸展、沉积作用和岩浆活动. *地质论评*, 1993, 9(6): 535–547
  - 18 Ren J, Tamaki K, Li S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 2002, 344(3~4): 175–205[DOI]
  - 19 Jolivet L. America-Eurasia plate boundary in eastern Asia and the opening of marginal basins. *Earth Planet Sci Lett*, 1987, 80(2~3): 258–282
  - 20 Chen W, Nabelek J. Seismic strike-slip faulting and the development of the North China basin. *Tectonics*, 1988, 7(5): 975–989
  - 21 胡朝元. 渤海湾盆地的形成机理与油气分布特点新议. *石油实验地质*, 1982, 4(3): 161–167
  - 22 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程. *石油实验地质*, 1995, 17(4): 316–323
  - 23 邓起东, 闵伟, 晁洪太, 等. 渤海地区新生代构造与地震活动. 见: 卢演涛, 高维明, 陈国星, 等主编. *新构造与环境*. 北京: 地震出版社, 2001. 218–233
  - 24 Tapponnier R, Peltzer G, Le Dain A, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, 10(12): 611–616[DOI]
  - 25 Jolivet L, Tamaki K, Fournier M. Japan sea, opening history and mechanism: A synthesis. *J Geophys Res*, 1994, 99(B11): 22237–22259[DOI]
  - 26 Worrall D, Kruglyak V, Kunst F, et al. Tertiary tectonics of the sea of Okhotsk, Russia: Far-field effects of the India-Eurasia collision. *Tectonics*, 1996, 15(4): 813–826[DOI]
  - 27 Liu M, Cui X, Liu F. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? *Tectonophysics*, 2004, 393(1~4): 29–42[DOI]
  - 28 Watson M, Hayward A, Parkinson D, et al. Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition onshore. *Mar Petrol Geol*, 1987, 4(3): 205–225[DOI]
  - 29 Northrup C, Royden L. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia. *Geology*, 1995, 23(8): 719–722[DOI]
  - 30 Flower M, Russo R, Tamaki K, et al. Mantle contamination and the Izu-Bonin-Mariana (IBM) “high-tide mark”: evidence for mantle extrusion caused by Tethyan closure. *Tectonophysics*, 2001, 333(1~2): 9–34[DOI]
  - 31 周建勋, 漆家福. 曲折边界斜向裂陷伸展的砂箱实验模拟. *地球科学*, 1999, 24(6): 630–634
  - 32 McClay K. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies. *Mar Petrol Geol*, 1990, 7(3): 206–233[DOI]
  - 33 徐杰, 高占武, 宋长青, 等. 太行山山前断裂带的构造特征. *地震地质*, 2000, 22(2): 111–122
  - 34 Grimmer J, Jonckheere R, Enkelmann E, et al. Cretaceous-Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (eastern China). *Tectonophysics*, 2002, 359(3~4): 225–253[DOI]
  - 35 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 郯庐断裂带走滑时代的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代学研究及其构造意义. *中国科学, D辑*, 2001, 31(3): 250–256
  - 36 周建勋, 徐凤银, 胡勇. 柴达木盆地北缘中、新生代构造变形及其对油气成藏的控制. *石油学报*, 2003, 24(1): 19–24
  - 37 Tamaki K, Honza E. Global tectonics and formation of marginal

- basins: role of the western Pacific. *Episodes*, 1991, 14(3): 224–230
- 38 Thorkelson D. Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation. *Tectonophysics*, 1996, 255(1~2): 47–63[DOI]
- 39 Johnston S, Thorkelson D. Cocos-Nazca slab window beneath Central America. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 146(3~4): 465–474[DOI]
- 40 Kinoshita O. Migration of igneous activities related to ridge subduction in Southwest Japan and the East Asian continental margin from the Mesozoic to the Paleogene. *Tectonophysics*, 1995, 245(1~2): 25–35[DOI]
- 41 Kinoshita O. Slab window-related magmatism caused by the Kula-Pacific ridge subduction beneath the Eurasia continent in the Cretaceous. *Episodes*, 1997, 20(3): 185–187
- 42 Kinoshita O. Possible manifestations of slab window magmatisms in Cretaceous southwest Japan. *Tectonophysics*, 2002, 344(1~2): 1–13[DOI]
- 43 D’Orazio M, Agostini S, Innocenti F, et al. Slab window-related magmatism from southernmost South America: the Late Miocene mafic volcanics from the Estancia Glencross Area (~52°S, Argentina-Chile). *Lithos*, 2001, 57(2~3): 67–89[DOI]
- 44 Bourgois J, Michaud F. Comparison between the Chile and Mexico triple junction areas substantiates slab window development beneath northwestern Mexico during the past 12–10 Myr. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 201(1): 35–44[DOI]
- 45 Osozawa S. Double ridge subduction recorded in the Shimanto accretionary complex, Japan, and plate reconstruction. *Geology*, 1992, 20(10): 939–942[DOI]
- 46 Konstantinovskaia E. Arc-continent collision and subduction reversal in the Cenozoic evolution of the Northwest Pacific: an example from Kamchatka (North Russia). *Tectonophysics*, 2001, 333(1~2): 75–94[DOI]