

# New Understanding of Boundary Fault Evolution and Its Petroleum Geological Significance in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

Hengmao Tong<sup>1</sup>, Faxiong Gong<sup>2</sup>, Lingjian Meng<sup>2</sup>, Baoyin Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing

<sup>2</sup>Exploration and Development Research Institute, Petro China Jidong Oilfield Company, Tangshan Hebei

Email: tonghm@cup.edu.cn, Tong-hm@163.com

Received: Apr. 11<sup>th</sup>, 2017; accepted: Apr. 27<sup>th</sup>, 2017; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

On the basis of structural analysis of 3D seismic data and tectonic model of boundary faults migration in Nanpu sag, new understanding of boundary fault evolution is proposed, and its petroleum geological significance is analyzed. The results show that, (1) with evolution of tectonic stress field, the boundary faults of Nanpu sag are distinctly segmented, and their position, properties, roles and activation change significantly in different rifting stage. (2) The northern boundary fault in E<sub>2</sub>S<sup>3</sup> (Paleo-Xinanzhuang Fault) controls main hydrocarbon source rock deposition, and further control oil and gas accumulation in the northern uplift. (3) Prediction model of sediment source port is proposed, and the distribution sediment source port along northern boundary fault is predicted in Nanpu sag. (4) The migration of boundary fault activation leads to change of fluid potential field in Shichang Sub-sag, Nanpu sag.

## Keywords

Nanpu Sag, Boundary Fault, Pre-Existing Weakness, Two-Phases Extension, Source Port Prediction

---

# 渤海湾盆地南堡凹陷北边界断层演化及其石油地质意义

童亨茂<sup>1</sup>, 龚发雄<sup>2</sup>, 孟令箭<sup>2</sup>, 赵宝银<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京

<sup>2</sup>中国石油冀东油田分公司勘探开发研究院, 河北 唐山

Email: tonghm@cup.edu.cn, Tong-hm@163.com

收稿日期：2017年4月11日；录用日期：2017年4月27日；发布日期：2017年4月30日

## 摘要

本文在对三维联片地震资料构造解析及边界断层“跃迁”构造模式的基础上，提出了南堡凹陷北边界断裂形成演化的新认识，并阐述其石油地质意义。结果表明，① 南堡凹陷在断陷阶段，北边界断层存在显著的分段性，而且随着应力场的演化，位置、性质和作用是不不断变迁的；②  $E_2s^3$ 期边界断层(古西南庄断层)控制了南堡凹陷主力烃源岩的分布，并进一步控制北部周边凸起的油气成藏；③ 提出了裂陷边界断层物源口分布的预测模式，并预测了南堡凹陷北部边界的物源口分布；④ 边界断层主控性质的“跃迁”，导致南堡凹陷拾场次凹流体势场的变化。

## 关键词

南堡凹陷，边界断层，先存构造，两期伸展，物源口预测

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

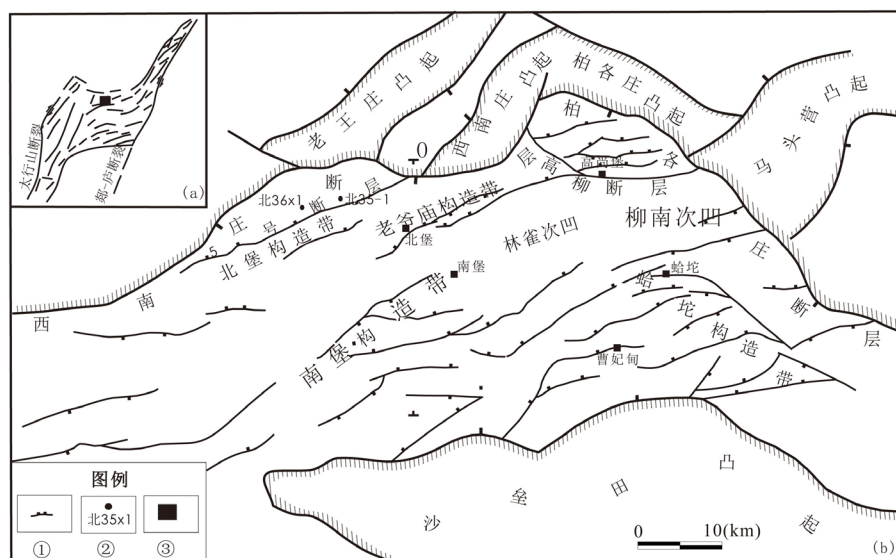
南堡凹陷(图 1)是新生代裂陷盆地——渤海湾盆地北部的一个三级负向构造单元，沉积了始新统以来的地层(表 1 [1])，是黄骅拗陷东北部的富烃凹陷，油气资源异常丰富[2] [3] [4] [5]。

南堡凹陷所在的渤海湾盆地位于中国东部，油气资源十分富集，原油产量约占全国的三分之一[6]。渤海湾盆地是中国东部典型的裂陷盆地，经历了复杂的构造演化历史[7] [8] [9] [10] [11]，其中包括古近纪的多期裂陷作用和新近纪的拗陷作用。渤海湾盆地的构造面貌十分复杂，不同构造单元及同一区域的不同构造演化阶段的构造特征表现出很大的差异，不同构造单元(如不同凹陷)边界断裂的差异表现得尤为突出。然而，目前对渤海湾盆地构造演化起关键作用的边界断裂在不同构造演化阶段的变迁及其对油气形成的控制和影响还缺乏有针对性的研究。

边界断层控制裂陷盆地断陷阶段的基底沉降和沉积物充填。现代伸展构造的研究成果和物理模拟实验结果表明，裂陷盆地内边界断层的几何形态、性质、活动演化历史对盆地的形成和演化、沉积物充填和油气成藏有重要的控制作用[12] [13] [14] [15]。边界断裂形成和演化的正确认识是裂陷盆地分析和油气勘探的重要基础。

南堡凹陷已有的构造研究集中在断裂的分布特征、演化及盆地的形成机制[2] [3] [16]、断裂系统的成因机制及沙箱模拟实验[17] [18]、以及断裂系统的构造解析及新生代应力场演化研究[1]等，其中，童亨茂等(2013) [1]提出的南堡凹陷两期伸展应力场演化研究成果(40Ma 前( $E_2s^3$  沉积时期)，北西 - 南东方向伸展；38Ma 后( $E_2s^1$ -Q 沉积时期)是本文研究的重要基础。然而而对南堡凹陷边界断裂的形成和演化还缺乏有针对性的研究。

长期以来，西南庄断层和柏各庄断层一直被认为是南堡凹陷的北部边界断层，而高柳断层则是凹陷内长期活动的二级断层[2] [3] [17] [19] [20] [21] [22] [23]。然而上述这些长期以来的认识却无法解释南堡凹陷勘探实践中的系列现象。为此，童亨茂等对南堡凹陷北部边界断裂进行重新解释和厘定，提出了



**Figure 1.** The region map of Nanpu sag (modified from Tong et al., 2013). The rectangular in Figure (a) shows the location of Figure b in Bohai Bay basin. Legend: ① fault and dip direction, ② well and its name, ③ position of Nanpu sag in Bohai bay basin.

**图 1.** 南堡凹陷区域位置图(据童亨茂等, 2013, 修改)。(a)中的方框为本图 b 在渤海湾盆地中的位置。图例：① 断层及倾向，② 井位及编号，③ 南堡凹陷在渤海湾盆地中的位置

**Table 1.** Strata and tectonic evolution table of Nanpu sag (from Tong, et al., 2013)

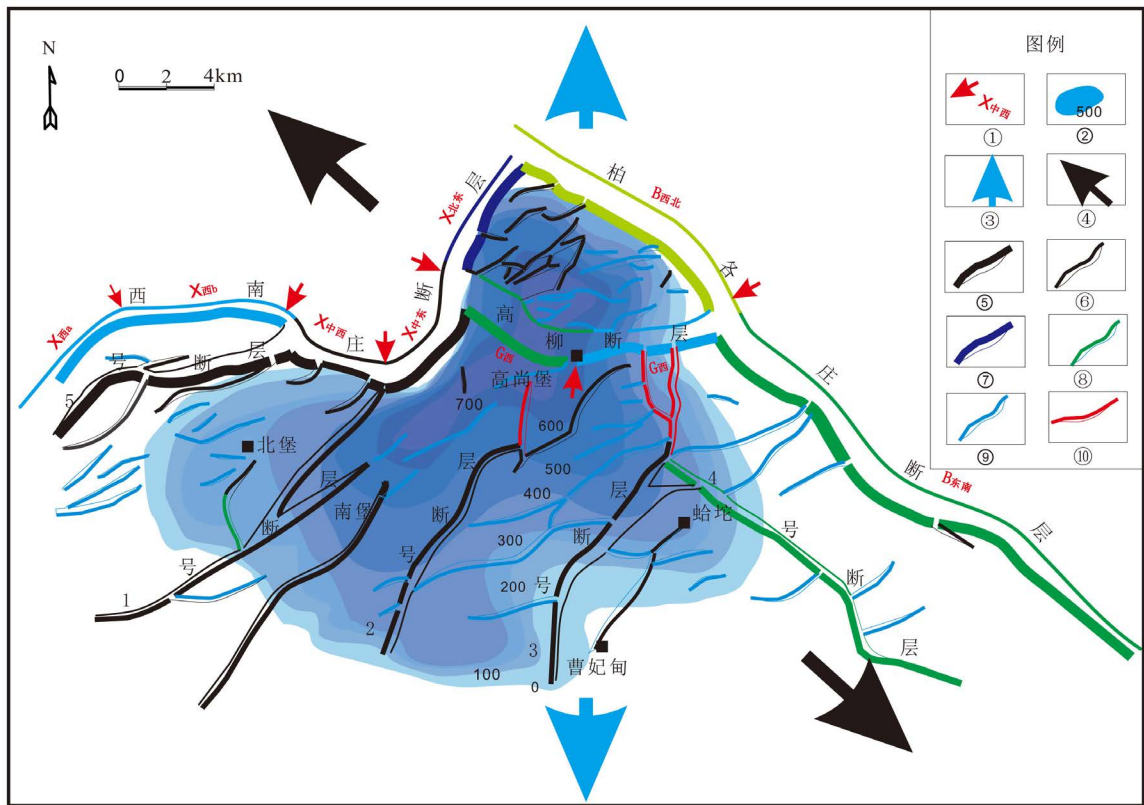
**表 1.** 南堡凹陷地层及构造演化简表(据童亨茂等, 2013)

地层			底界年龄(Ma)	演化阶段	构造作用及方向
系	组和段	地层代号			
第四系		Q	2.0		南北向伸展 $\updownarrow$
新近系	明化镇组	N <sub>2</sub> m	5.1	拗陷	构造平静期
	馆陶组	N <sub>1</sub> g	23.3		构造平静期
	东营组 1 段	E <sub>3</sub> d <sup>1</sup>			
	东营组 2 段	E <sub>3</sub> d <sup>2</sup>			
古近系	东营组 3 段	E <sub>3</sub> d <sup>3</sup>	36		南北向伸展 $\updownarrow$
	沙河街组 1 段	E <sub>2</sub> s <sup>1</sup>	38	裂陷	
	沙河街组 2 段	E <sub>2</sub> s <sup>2</sup>	40		构造平静期
	沙河街组 3 段	E <sub>2</sub> s <sup>3</sup>	45.4		北西 - 南东向伸展 $\nwarrow \nearrow$

边界“跃迁”的构造模型，解决了勘探实践中的矛盾(另文阐述)。在此基础上，本文提出南堡凹陷北边界断裂形成演化的新认识，并进一步阐述其石油地质意义。

## 2. 西侧北边界断裂的形成演化

按照新的解释方案(另文详述)，西北边界断层在 E<sub>2</sub>s<sup>3</sup> 时期由西南庄断层和 5 号断层(即古西南庄断层)构成，并在后期的构造演化过程中存在跃迁特征(图 2)：E<sub>2</sub>s<sup>3</sup> 时期：5 号断层、西南庄断层的中西段及以东部分(图 2)构成南堡凹陷的西北边界断层(“古西南庄断层”)，西南庄断层西段并非为沙三期的边界



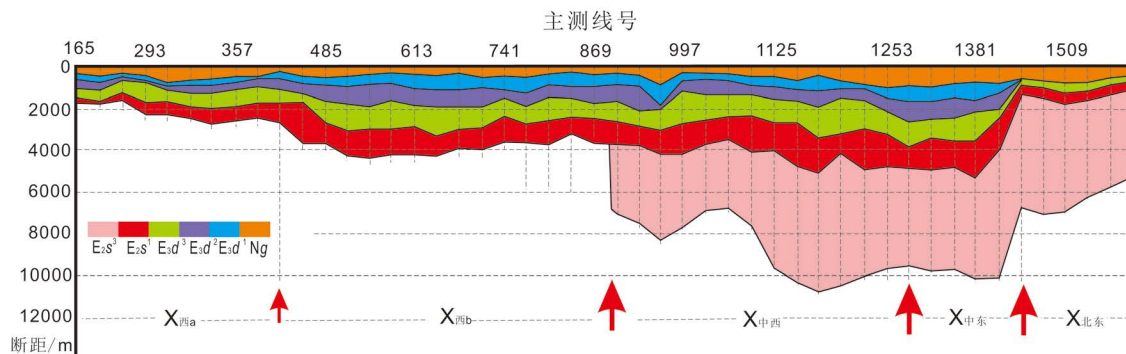
**Figure 2.** Northern boundary fault ( $E_{2s^3}$ ) and source rock distribution in Nanpu sag. ① Main fault segment point and its name, ② Contour of source rock thickness and its value; ③ extension direction during  $E_{2s^1-Q}$ , ④ extension direction during  $E_{2s^3}$ ; ⑤ Boundary fault formed in  $E_{2s^3}$ , ⑥ normal fault formed in  $E_{2s^3}$ , ⑦ Boundary fault formed in  $E_{2s^3}$  (no activation during  $E_{3d^{1-2}}$ ) ⑧ transfer fault in  $E_{2s^3}$ ; ⑨ fault formed during  $E_{2s^1-Q}$ , ⑩ transfer fault during  $E_{2s^1-Q}$

**图 2.** 南堡凹陷沙三底界边界断裂分段、演化及成因模式及  $E_{2s^3}$  烃源岩分布图。① 主控断层的分段点及段落名称，② 烃源岩厚度等值线及数值；③  $E_{2s^1-Q}$  期间的伸展方向，④  $E_{2s^3}$  期的伸展方向；⑤  $E_{2s^3}$  期的边界断层(后期持续活动)，⑥  $E_{2s^3}$  期形成的盆内正断层，⑦  $E_{2s^3}$  期的边界断层( $E_{3d^{1-2}}$  停止活动)，⑧  $E_{2s^3}$  期的变换断层；⑨  $E_{2s^1-Q}$  期间形成的正断层，⑩  $E_{2s^1-Q}$  期间的变换断层

断层；当应力体制从北西 - 南东向伸展转化为南北向伸展后，西南庄断层西段开始形成，并强烈活动，替代 5 号断层成为该地区的边界断层。本文在此基础上，结合三维连片地震资料的构造解析，定量分析西侧北边界断层的形成演化。

### 2.1. 西南庄断层的分段性

作为西北边界断层主体(除西段在  $E_{2s^3}$  时期外)的西南庄断层具有显著的分段性。根据走向和活动性的差异，西南庄断层可以划分为 4 段(西段—— $X_{西}$ ，中西段—— $X_{中西}$ ，中东段—— $X_{中东}$ ，北东段—— $X_{北东}$  见图 2)，分段点正是高柳断层、1-1 号断层和 5 号断层与其的连接点(图 2)，西段可进一步划分为两个亚段( $X_{西a}$  和  $X_{西b}$ )。不同段落的断层走向、性质和活动存在显著的差异：西段(老爷庙构造以西)为北东东( $X_{西a}$  亚段)和近东西向( $X_{西b}$  亚段)，从西向东活动量逐渐增大(图 3)， $E_{3s^1}$  以来开始活动；中西段近东西走向，长期活动，活动总量在西南庄断层中是最大的，断层最大剖面滑距达到近 11,000 m (图 3)；中东段北东走向，长期活动，活动量仅次于中西段；北东段北北东走向，古近纪  $E_{2s^3}$ - $E_{3d^3}$  期间活动， $E_{3d^{1-2}}$  期间没有活动， $E_{2s^3}$  活动量大，但活动总量比较小(图 3)。新近纪以来，西南庄断层不同段落的活动性也存在一定的差异，但其差异比古近纪要小很多(图 3)。



**Figure 3.** Dip-slip of Xinanzhuang Fault in different reflection interface and in different survey line. The spacing between two reflection interface shows the activity of the fault (same in the following); red arrow is fault segment point, the name of fault segment seen in **Figure 2**

**图 3.** 西南庄断层不同反射界面断层剖面滑距横向变化(不同测线)分布图。两个反射界面间的宽度反映该期间断层的活动量(下同); 红色箭头为断层分段点, 段落名称见图 2

## 2.2. 西北边界断层的演化过程

根据上述地震资料的构造解析, 结合南堡凹陷应力场演化的成果[1], 本文对西北边界断层的形成演化阐述如下。

①  $E_2s^3$  期, 在北西 - 南东方向的伸展作用下, 由于西南庄断层的中西段、中东段和北东段及 5 号断层所在处存在先存断裂[1], 形成先存构造复活断层[24], 并逐渐链接在一起, 它们共同构成  $E_2s^3$  期的西北边界断层(古西南庄断层, 图 2)。但由于不同段落走向和力学性质存在差异, 结果不同段落的活动性和断层性质存在差异, 导致不同段落控制的  $E_2s^3$  地层(本区主要的烃源岩)分布及厚度存在差异(图 2)。此时, 西南庄断层的西段没有形成(图 2)。

②  $E_2s^2$  期, 是应力体制的转换期[1], 南堡凹陷表现为断拗沉积, 构造活动性弱, 西北边界断层继承性活动, 但活动量很小。该阶段, 西南庄断层的西段还没有形成。

③  $E_3s^1$ - $E_3d^3$  期, 构造作用从北西 - 南东向伸展转化为南北向伸展[1]。在南北向伸展作用下, 西南庄断层西段形成, 替代 5 号断层成为边界断层(边界断层的跃迁), 并与西南庄断层的中西段、中东段和东段链接成为南堡凹陷的西北边界断层, 现今的西南庄断层形成; 西南庄断层的中西段和中东段活动性增强, 由斜滑正断层转化为正断层; 而北东段活动性迅速减弱, 转化为正走滑断层; 5 号断层继承性活动, 但活动性减弱, 由正断层转化为斜滑正断层, 转化为南堡凹陷内的二级断层。

④  $E_3d^1$ - $E_3d^2$  时期, 西南庄断层西段、中西段和中东段继承性活动, 继续作为南堡凹陷的西北边界断层; 西南庄断层北东段停止活动, 边界断层被高柳断层所取代。5 号断层继续继承性活动。

⑤  $N_1g$  时期, 南堡凹陷是构造活动的平静期, 表现为拗陷沉积, 西北边界断层(包括 5 号断层)几乎没有活动。

⑥  $N_2m$  时期, 南北向伸展继续, 而且伸展作用十分强烈, 西南庄断层东段重新开始活动, 其它段落也有强烈的活动性, 西南庄断层重新成为一条统一的断层。5 号断层继续继承性强烈活动。在整个南北向伸展作用期间,  $N_2m$  时期伸展作用强度和断层强度均是最大的。但  $N_2m$  时期, 盆地总体表现为拗陷沉降, 边界断层不复存在, 西南庄断层也不再是边界断层。

## 3. 高柳断层的形成演化过程

高柳断层为南堡凹陷是南堡凹陷内最大的断裂, 前人都把高柳断层作为凹陷内的二级断层(即“控带断层” [2] [3] [16])。

然而, 根据高柳断层以北(高柳断层上升盘)的拾场次凹整体缺失东营组一、二段地层, 而高柳断层以南(高柳断层下降盘)相应的地层则很厚, 表明在  $E_3d^1-E_3d^2$  期间, 高柳断层是南堡凹陷的边界断层, 并非凹陷内部的二级断层。另外, 根据高柳断层主体区域(高柳断层的东段)上下盘沙三段地层厚度是一致的, 断层的生长指数为 1 (图 4 中  $G_{东}$  段  $E_2s^3$  期间的滑距为 0), 表明该断层的东段在沙三期并不存在, 是在后期( $E_3s^1$  期以来)形成的断层。在此基础上, 结合研究区应力场演化的认识和系统的构造解析, 本文提出了高柳断层形成演化的新认识。

根据断层的走向和活动性, 高柳断层可以划分为两段(图 2): 西段( $G_{西}$ )和东段( $G_{东}$ )。西段北西西走向,  $E_2s^3$  期间有活动(图 2, 图 4),  $E_3s^1$  以来强烈活动; 东段东西走向,  $E_2s^3$  期间没有有活动(不存在),  $E_3s^1$  以来形成并强烈活动(图 2, 图 4)。根据本文的研究, 高柳断层不同段落及不同演化阶段其性质是发生变化的。

①  $E_2s^3$  期, 高柳断层西段断层已经出现, 断层走向与伸展方向平行, 根据广义断层模式(先存构造条件下的断层作用模式[24] [25] [26] [27] [28]), 预测是一条变换断层(图 2); 高柳断层东段还未出现, 完整的高柳断层还未形成。

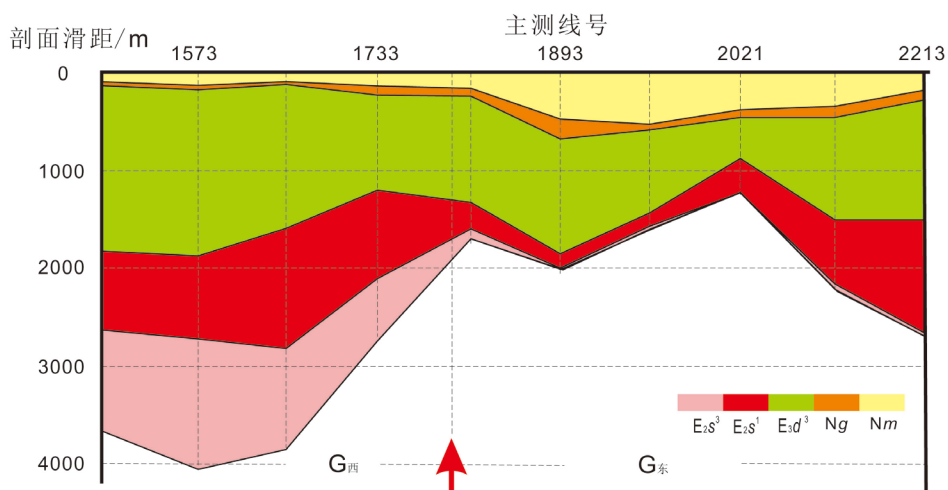
②  $E_3s^2$  期, 南堡凹陷是构造活动的平静期, 表现为拗陷沉积, 高柳断层没有活动;

③  $E_3s^1-E_3d^3$  期, 在南北向伸展作用下, 高柳断层东段开始形成(为新生的库伦断层[24]), 高柳断层西段继承性发育, 为先存构造复活断层[24], 东西两段连接在一起首次形成完整的高柳断层。该阶段高柳断层控制  $E_3s^1$  和  $E_3d^3$  地层沉积, 但上下盘均有  $E_3s^1$  和  $E_3d^3$  地层, 只是厚度存在差异。这样, 高柳断层在  $E_3s^1-E_3d^3$  期间是一条控制高柳构造带的二级断层。

④  $E_3d^1-E_3d^2$  时期, 西南庄断层北东段( $X_{北东}$ )和柏各庄断层的西北段( $B_{西北}$ )没有活动, 导致拾场次凹缺失  $E_3d^1-E_3d^2$  地层, 而高柳断层在此期间强烈活动, 控制  $E_3s^1$  和  $E_3d^2$  地层沉积, 成为凹陷的主控边界断层(图 2); 表明高柳断层  $E_3d^1-E_3d^2$  期间, 与西南庄断层中、东段及柏各庄断层东南段一起成为凹陷的北边界主控断层。

⑤  $N_{1g}$  时期, 南堡凹陷是构造活动的平静期, 表现为拗陷沉积, 高柳断层几乎没有活动。

⑥  $N_{2m}$  时期, 南北向伸展继续, 高柳断层继承性强烈活动。但盆地总体表现为拗陷沉积, 边界断层不复存在。



**Figure 4.** Dip-slip of Gaoliu fault in different reflection interface and in different survey line. Red arrow is fault segment point, the name of fault segment seen in **Figure 2**

**图 4.** 高柳断层不同反射界面断层剖面滑距横向变化(不同测线)分布图。红色箭头为断层分段点, 段落名称见图 2

## 4. 柏各庄断层的形成演化

柏各庄断层一直被认为是南堡凹陷的东北边界断层[2] [3] [16] [17] [23], 然而, 本文的研究表明, 柏各庄断层的实际情况则较为复杂, 具有明显的“空”(具有显著的分段性)-“时”(断层性质和作用在不同构造演化阶段产生变化)差异性。

### 4.1. 柏各庄断层的分段性

根据断层活动量的差异以及断层平剖面组合的变化, 以高柳断层为界, 柏各庄断层可以划分为两段(图 2): 西北段(B<sub>西北</sub>)和东南段(B<sub>东南</sub>)。西北段和东南段虽然走向均为北西向, 但活动性存在很大的差异(图 2, 图 5): 西北段 E<sub>3</sub>d<sup>1-2</sup> 期间没有活动, E<sub>2</sub>s<sup>3</sup>-E<sub>3</sub>d<sup>3</sup> 期间活动量也比较小; 东南段长期活动, 活动量很大(断层最大剖面滑距超过 7000 m, 图 5), 仅次于西南庄断层。

### 4.2. 柏各庄断层的演化过程

① E<sub>2</sub>s<sup>3</sup> 期, 在北西-南东方向的伸展作用下, 由于柏各庄断层所在处存在先存深大断裂[2] [3], 形成先存构造复活断层(即柏各庄断层)。但由于先存构造的走向与伸展方向近于平行, 根据广义断层模式预测是一条以走滑(左旋)为主的正断层, 控制 E<sub>2</sub>s<sup>3</sup> 地层的沉积, 构成南堡凹陷的东北边界。但柏各庄断层 E<sub>2</sub>s<sup>3</sup> 沉积的控制作用远弱于西南庄断层[1]。该阶段, 柏各庄断层是一条统一的断层, 没有明显的分段性。

② E<sub>2</sub>s<sup>2</sup> 期, 是应力体制的转换期[1]南堡凹陷表现为断拗沉积, 构造活动平静, 柏各庄断层活动性很弱, 断层的统一性继续保持。

③ E<sub>3</sub>s<sup>1</sup>-E<sub>3</sub>d<sup>3</sup> 期, 构造作用从北西-南东向伸展转化为南北向伸展。在南北向伸展作用下, 柏各庄断层的活动性迅速上升, 断层性质由正走滑断层转化为斜滑正断层, 成为 E<sub>3</sub>s<sup>1</sup> 地层的主控边界断层, 断层分段性还未有显著的表现。到 E<sub>3</sub>d<sup>3</sup> 时期, 由于高柳断层的形成和活动迅速加大, 柏各庄断层的西北段活动迅速减小, 而东南段则继续强烈活动, 柏各庄断层分段性开始显著出现。

④ E<sub>3</sub>d<sup>1</sup>-E<sub>3</sub>d<sup>2</sup> 时期, 柏各庄断层的西北段(B<sub>西北</sub>)和西南庄断层东段(X<sub>东</sub>)停止活动, 导致拾场次凹缺失 E<sub>3</sub>d<sup>1</sup>-E<sub>3</sub>d<sup>2</sup> 地层, 而高柳断层在此期间强烈活动, 控制 E<sub>3</sub>s<sup>1</sup> 和 E<sub>3</sub>d<sup>3</sup> 地层沉积, 成为凹陷的主控边界断层(图 2); 柏各庄断层东南段继续强烈活动, 断层的性质依然是斜滑正断层, 与高柳断层、西南庄断层(东段除外)一起成为凹陷的北边界主控断层, 柏各庄断层分段性达到极点。

⑤ N<sub>1</sub>g 时期, 南堡凹陷是构造活动的平静期, 表现为拗陷沉积, 柏各庄断层几乎没有活动。

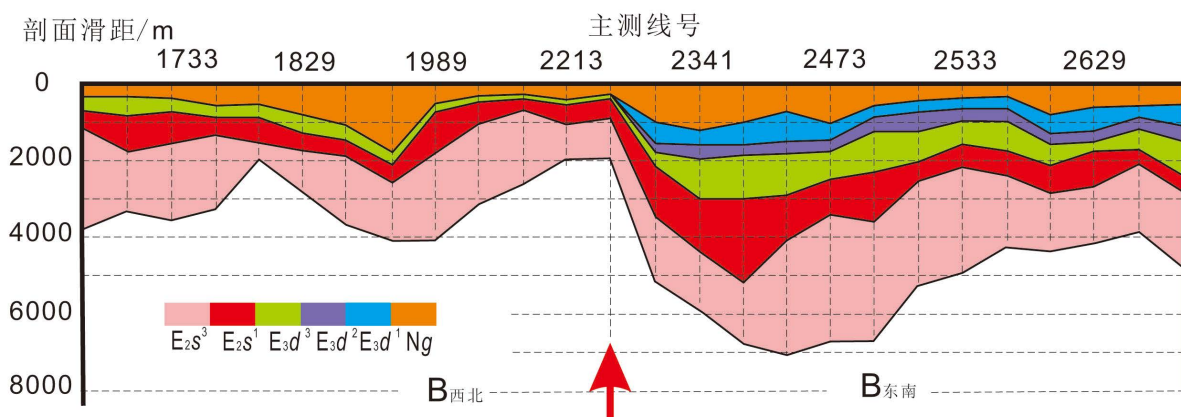


Figure 5. Dip-slip of Baigezhuang Fault in different reflection interface and in different survey line. Red arrow is fault segment point, the name of fault segment seen in Figure 2

图 5. 柏各庄断层不同反射界面断层剖面滑距横向变化(不同测线)分布图。红色箭头为断层分段点, 段落名称见图 2

⑥  $N_2m$  时期, 南北向伸展继续, 而且伸展作用十分强烈, 柏各庄断层整体继承性活动, 重新成为一条统一的断层。断层的性质依然为斜滑正断层。但盆地总体表现为拗陷沉降, 边界断层不复存在, 柏各庄断层也不再是边界断层。

## 5. 北边界断层演化对石油地质要素的控制

从前面的分析可以看出, 南堡凹陷边界断层在不同的构造演化阶段其性质、活动量存在很大的差异, 还存在显著的“跃迁”特征, 导致对南堡凹陷烃源岩沉积、储层物源、以及周边凸起潜山成藏等产生重要的控制和影响。

### 5.1. 对烃源岩沉积的控制作用

已有的勘探实践表明[2] [3] [19] [21],  $E_2s^3$  是南堡凹陷最主要的烃源岩发育层段; 另外, 南堡凹陷主体是“北断南超”的复式半地堑[1], 北边界断层控制  $E_2s^3$  期南堡凹陷的沉降和地层的沉积。

前面的分析表明, 古西南庄断层(5号断层 - 西南庄断层中西段、中东段和北东段)为南堡凹陷的主控边界断层, 控制南堡凹陷  $E_2s^3$  地层的沉积和分布。根据“广义断层模式”, 断层的①方位及②是否在先存构造基础上发育是控制断层活动性的两个主导因素。结果, 由于古西南庄断层不同段落走向的差异(均先存构造基础上发育), 导致不同段落的断层活动性存在很大的差异: 西南庄断层北东段和中东段的走向(北东走向)与伸展方向( $144^\circ$ )相对最为协调, 导致该两个段落  $E_2s^3$  期的活动性相对最大(图 3), 控制  $E_2s^3$  期烃源岩的厚度也相对最大(图 2); 西南庄断层中西段近东西走向(平均走向为  $98^\circ$ ), 与伸展方向不太协调, 但它是在先存构造基础上发育, 也有较强的活动性(图 3); 5号断层平均走向为  $70^\circ$  左右, 与伸展方向也比较协调, 但它  $E_2s^3$  期的活动性明显小于西南庄断层的北东段和中东段, 但比中西段略强, 对  $E_2s^3$  期的烃源岩也有明显的控制作用(图 2)。

该认识可以很好地解决勘探实践中出现的问题: 老王庄凸起和西南庄凸起在现今虽然同属西南庄断层的下降盘, 但按照本文的研究成果, 两者的石油地质条件迥异: 西南庄凸起紧邻油气  $E_2s^3$  烃源岩(图 2), 而且拾场次凹的烃源岩东营期经历了“跷跷板”的反转[1], 西南庄凸起成为油气运移十分有利的指向区, 是油气成藏的有利区; 而老王庄凸起远离烃源岩(图 2),  $E_2s^3$  烃源岩的油气运移被 5号构造带阻隔, 油气难以运移到老王庄凸起。这样, 老王庄凸起和西南庄凸起勘探成效差异的疑惑也迎刃而解。

### 5.2. 对物源口分布的控制作用

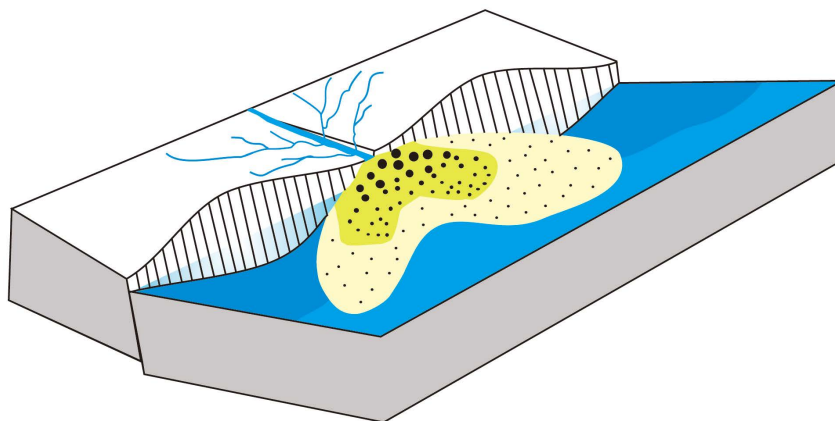
物源口的确定对储层分布预测研究具有重要意义。裂陷盆地断陷发育阶段, 陡坡带的物源是通过边界断层上升盘的低洼部位(山口)进入盆地内的, 该低洼部位就是陡坡带的物源口。

由于均衡效应, 边界断层活动时, 下降盘沉降的同时伴随着上升盘的隆升[29], 而且隆升的幅度与沉降的幅度(控制沉积地层的厚度)大体成正比(即边界正断层活动的“拉弓效应”, 图 6)。这样, 边界正断层活动量大(控制的沉降幅度大)的部位, 也是上升盘隆起幅度相对较高的部位; 反之, 则是上升盘较为低洼的部位(图 6)。边界大断层大多由数条断层链接而成, 链接处往往是断距相对较小的部位, 形成物源口(图 6)。

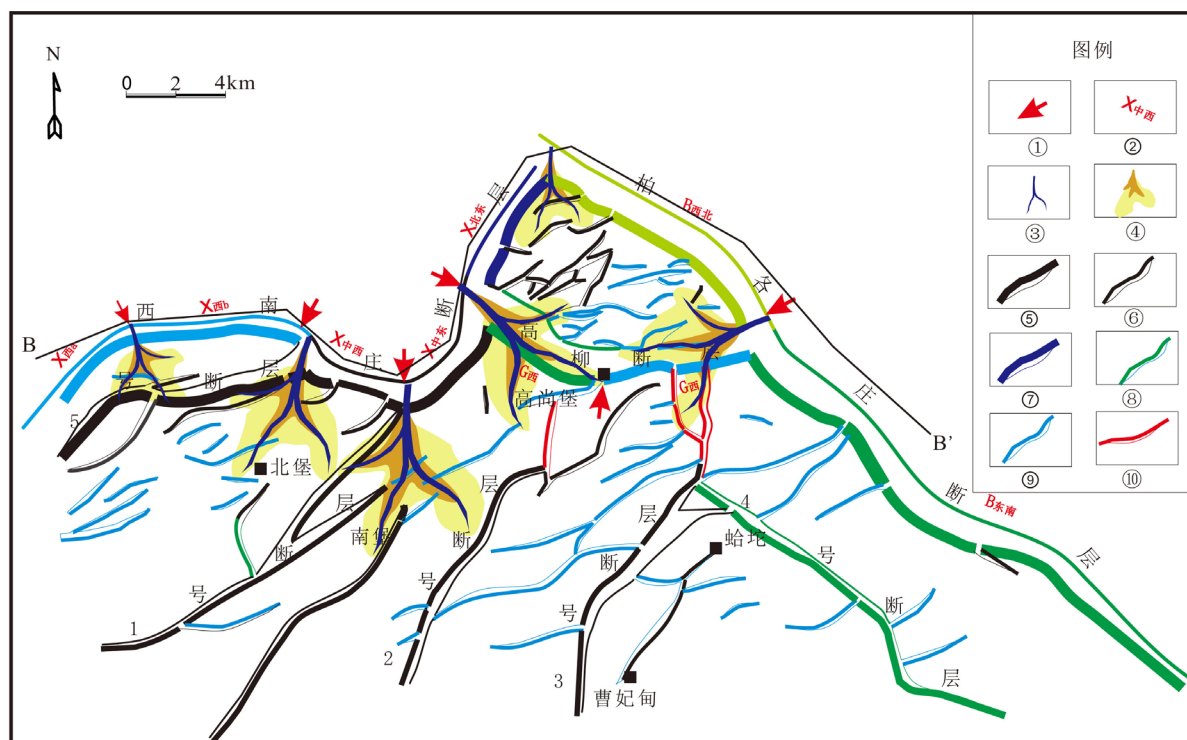
西南庄断层是具有明显的分段性, 从断层活动量分布图(图 3)可以看出, 也是由多条断层链接而成。不同段落链接处(分段处)是断层滑距相对较小的区域, 预测也是边界断层上升盘的低洼部位, 即物源口(即图 2 中红色箭头所指的位置)。按照这种方法同样对柏各庄断层和高柳断层都进行了物源口的预测, 并编制了北边界断层相关的“源 - 汇”分布预测图(图 7)。

为了验证这种物源口预测方法的可靠性, 沿西南庄断层 - 柏各庄断层上升盘切制任意线地震剖面, 结果清晰地显示出物源口的存在(为明显的古地貌低洼处, 图 8), 并与预测的物源口存在很好的对应关系





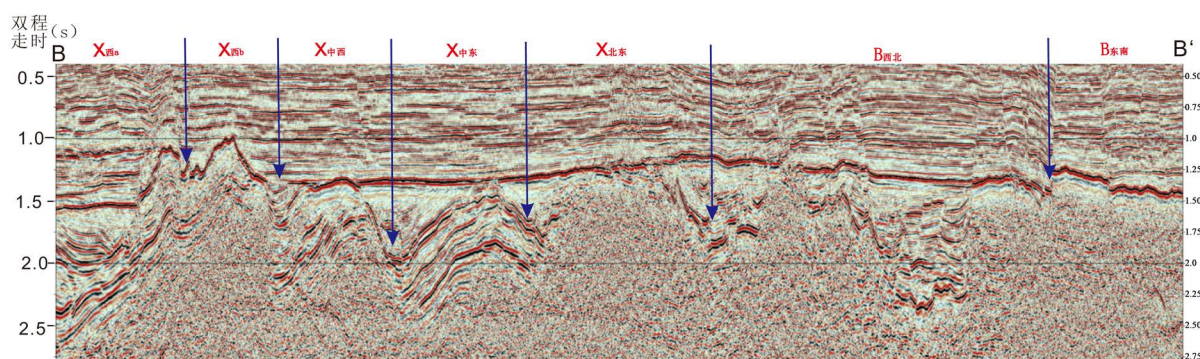
**Figure 6.** “Bow-string effect” of normal fault displacement distribution and model of “fault-link control source”  
**图 6.** 正断层位移分布的“拉弓效应”及其断层“链接控源”模式图



**Figure 7.** “Source-sink” system prediction map in the northern Nanpu sag. ① Main fault segment point, ② name of main fault segment; ③ predicted underwater branch channel, ④ predicted sediment dispersions; ⑤ boundary fault formed in  $E_2s^3$ , ⑥ normal fault formed in  $E_2s^3$ , ⑦ boundary fault formed in  $E_2s^3$  (no activation during  $E_3d^{1-2}$ ), ⑧ transfer fault in  $E_2s^3$ ; ⑨ fault formed during  $E_2s^1-Q$ , ⑩ transfer fault during  $E_2s^1-Q$ . Section BB' shows the position of **Figure 8**  
**图 7.** 南堡凹陷北部“源-汇”体系预测图。① 主控断层分段点, ② 主控断层; ③ 预测的水下分支河道, ④ 预测的沉积物分散体系; ⑤  $E_2s^3$ 期的边界断层(后期持续活动), ⑥  $E_2s^3$ 期形成的盆内正断层, ⑦  $E_2s^3$ 期的边界断层( $E_3d^{1-2}$ 停止活动), ⑧  $E_2s^3$ 期的变换断层; ⑨  $E_2s^1-Q$ 期间形成的正断层, ⑩  $E_2s^1-Q$ 期间的变换断层。剖面 BB' 示 **图 8** 测线的位置

(对比图 7 和图 8), 表明该物源口预测方法的可靠性。

在有三维地震资料的条件下, 预期这种按照边界断层分段处预测物源口位置的方法在裂陷盆地应具有普遍的适用性。



**Figure 8.** An arbitrary line reflection seismic section cut along the rising fault wall of the Xinanzhuang-Baigezhuang fault. The arrows are segment points of the boundary fault, and point to source port. The name of the fault segment and the position of the section are shown in **Figure 7**

**图 8.** 沿西南庄断层-柏各庄断层上升盘切制的任意线反射地震剖面。箭头为边界断层的分段界线，指向古地貌的低洼处(物源口)，断层段落名称和剖面位置见图 7

### 5.3. 对油气运移的控制作用

南堡凹陷边界断层对油气运移的控制作用表现在以下两个方面：①作为油气运移的通道；②边界断层的“跃迁”效应导致地层流体势场的变化。下面分别加以说明。

西南庄凸起位于南堡凹陷的隆起区，西南庄凸起潜山油藏显然是通过西南庄断层北东段的油气运移而形成。西南庄断层北东段是西南庄凸起潜山与凹陷(拾场次凹)烃源岩间的分隔性断层，拾场次凹烃源岩生成的油气通过西南庄断层北东段的侧向、垂向运移进入到西南庄潜山而成藏，即西南庄断层的北东段为西南庄凸起潜山油藏的油源断层。

边界断层的“跃迁”效应导致地层流体势场的变化是通过地层厚度“跷跷板”式的变化而导致的，在拾场次凹表现得最为显著[1]：受西南庄断层控制的沙三地层为“西断东超”的楔形，地层沉积后向南东东方向翘倾；到沙一时期，由于应力体制的转化，柏各庄断层成为主控断层，受此沙控制的一段地层则为“东断西超”的楔形，导致沙三地层倾向的反转，整体转化为向西翘倾，造成沙三地层流体势场根本的变化，使得拾场次凹的西部是沙三层油气运移的有利指向区。流体势场的这种变化，对西南庄潜山和高柳构造带西部的油气成藏十分有利，对西南庄断层(北东段)陡坡带岩性油气藏的形成也十分有利。

## 6. 结论

南堡凹陷在断陷阶段，北边界断层存在显著的分段性，而且随着应力场的演化，其位置、性质和作用是不不断变迁的，并存在显著的跃迁特征。

$E_2S^3$  期边界断层(古西南庄断层)控制了南堡凹陷主力烃源岩的分布，其中西南庄断层的中东段和北东段控制的烃源岩厚度最大，并进一步控制北部周边凸起的油气成藏。

利用边界正断层位移分布的“拉弓效应”，提出了裂陷边界断层物源口分布的预测模式，并预测了南堡凹陷北部边界的物源口分布。

主控断层性质的“跃迁”，造成地层厚度“跷跷板”式的变化，从而导致南堡凹陷拾场次凹流体势场的演变。

### 基金项目

国家自然科学基金项目(编号 41272160)和国家油气重大专项(2011zx05006-006-02-01)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 童亨茂, 赵宝银, 曹哲, 刘国玺, 顿小妹, 赵丹. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统成因的构造解析[J]. 地质学报, 2013, 87(11): 1-17.
- [2] 周海民, 董月霞, 等. 断陷盆地油气勘探理论与实践——以渤海湾盆地南堡凹陷为例[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2001: 250.
- [3] 周海民, 魏忠文, 曹中宏, 丛良滋. 南堡凹陷的形成演化与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 345-349.
- [4] 周海民, 丛良滋, 董月霞, 等. 断陷盆地油气成藏动力学与含油气系统表征——以渤海湾盆地南堡凹陷为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 11-131.
- [5] 周海民, 董月霞, 谢占安, 等. 断陷盆地精细勘探——渤海湾盆地南堡凹陷精细勘探实践与认识[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 156-631.
- [6] Jin, Q. and McCabe, P.J. (1998) Genetic Features of Petroleum Systems in Rift Basins of Eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, **15**, 343-358.
- [7] Allen, M.B., Macdonald, D.I.M., Xun, Z., Vincent, S.J. and Brouet-Menzies, C. (1997) Early Cenozoic Two-Phase Extension and Late Cenozoic Thermal Subsidence and Inversion of the Bohai Basin, Northern China. *Marine and Petroleum Geology*, **14**, 951-972.
- [8] Li, S., Zhao, G., Dai, L., et al. (2012) Cenozoic Faulting of the Bohai Bay Basin and Its Bearing on the Destruction of the Eastern North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, **47**, 80-93.
- [9] Qi, J. and Yang, Q. (2010) Cenozoic Structural Deformation and Dynamic Processes of the Bohai Bay Basin Province, China. *Marine and Petroleum Geology*, **27**, 757-771.
- [10] Ren, J., Tamaki, K., Li, S. and Zhang, J. (2002) Late Mesozoic and Cenozoic Rifting and Its Dynamic Setting in Eastern China and Adjacent Area. *Tectonophysics*, **344**, 175-205.
- [11] Tian, Z., Han, P. and Xu, K. (1992) The Mesozoic-Cenozoic East China Rift System. *Tectonophysics*, **208**, 341-363.
- [12] 周建勋, 漆家福, 童亨茂. 盆地构造研究中的砂箱模拟实验方法[M]. 北京: 地震出版社, 1999: 123.
- [13] 陆克政. 含油气盆地分析[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2001: 424.
- [14] 漆家福, 夏义平, 杨桥. 油气构造解析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 161.
- [15] Dooley, T., McClay, K.R. and Pascoe, R. (2003) 3D Analogue Models of Variable Displacement Extensional Faults, Applications to the Revallet Fault System, Offshore Mid-Norway. *Geological Society Special Publications*, **212**, 151-167. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.10>
- [16] 徐安娜, 郑红菊, 董月霞, 等. 南堡凹陷东营组层序地层格架及沉积相预测[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(4): 437-4431.
- [17] 周天伟, 周建勋, 董月霞, 王旭东, 常洪卫. 渤海湾盆地南堡凹陷新生代断裂系统形成机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 12-17.
- [18] 梁杰, 于福生, 刘国玺, 等. 南堡凹陷分期异向伸展变形叠加特征: 来自砂箱物理模拟实验的启示[J]. 现代地质, 2014, 28(1): 139-148.
- [19] 董月霞, 汪泽成, 郑红菊, 徐安娜. 走滑断层作用对南堡凹陷油气成藏的控制[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 424-430.
- [20] 王家豪, 王华, 周海民, 等. 河北南堡凹陷老爷庙油田构造活动与油气富集[J]. 现代地质, 2002, 16 (2): 205-2081.
- [21] 马乾, 张军勇, 李建林, 李文华, 刘国勇, 冯朝荣. 南堡凹陷扭动构造特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2): 183-189.
- [22] 范柏江, 刘成林, 庞雄奇, 张健, 李晓辉, 马俊宝. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统对油气成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 192-199.
- [23] 姜华, 王华, 林正良, 方欣欣, 赵淑娥, 任桂媛. 南堡凹陷古近纪幕式裂陷作用及其对沉积充填的控制[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 977-983.
- [24] Tong, H., Koyi, H., Huang, S. and Zhao, H. (2014) The Effect of Multiple Pre-Existing Weaknesses on Formation and Evolution of Faults in Extended Sandbox Models. *Tectonophysics*, **626**, 197-212.
- [25] Tong, H. (2010) A New Model for the Origin and Evolution of the Rift Basin Fault-Systems in the East and South China: A Case Study from Beibuwan Basin. *Abstract of Tectonic Crossroads: Evolving Orogens of Eurasia-Africa-Arabia Conference*, Ankara, 4-8 October 2010.

- 
- [26] Tong, H. and An, Y. (2011) Reactivation Tendency Analysis: A Theory for Predicting the Temporal Evolution of Preexisting Weakness under Uniform Stress State. *Tectonophysics*, **503**, 195-200.
- [27] 童亨茂. 岩石圈脆性断层作用力学模型[J]. 自然杂志, 2012, 34(6): 1-7.
- [28] 童亨茂, 陈正乐, 刘瑞珣. 广义剪切破裂准则[J]. 自然杂志, 2015, 37(6): 441-447.
- [29] Twiss, R.J. and Moores, E.M. (1992) *Structural Geology*. Freeman and Company, New York.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)