

DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508180016

# 基于抛物线型莫尔包络线的弧形正断层区 剥蚀量计算新方法

黄学尧<sup>1,2</sup>, 陈书平<sup>1,2,\*</sup>, 王中昱<sup>1,2</sup>, 邢锐修<sup>1,2</sup>, 王智慧<sup>1,2</sup>, 胡叶媚<sup>1,2</sup>, 周钰杰<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;  
3. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 102206)

**摘要:** 剥蚀厚度恢复在构造研究和石油勘探中都具有重要意义, 对于弧形正断层, 地层的剥蚀程度是影响残留断面几何形态的重要因素之一。如果决定断面形态的断裂准则已知, 则可根据残留断面计算剥蚀量。本文以抛物线型莫尔包络线理论为指导, 推导出了断层面倾角与断面深度的代数关系, 进而基于断层残留段, 得到了剥蚀量的计算公式。将该方法应用于济阳拗陷新生界与下伏地层之间的不整合, 首先根据岩石力学参数测试数据, 得到了济阳拗陷断面形态表达式, 然后利用残留断层面上两点进行验证, 最后通过计算得到了不整合剥蚀量。本文推导出的断层面倾角与深度的关系不仅可以给出弧形断面的理论解释, 而且为剥蚀量计算提供了一种新方法。

**关键词:** 断裂准则; 力学参数; 伸展断层; 剥蚀量; 济阳拗陷

**中图分类号:** P542.3; P551; TE122.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)03-0939-10

## A New Method for Estimating Denudation Thickness in Arcuate Normal Fault Zones Based on a Parabolic Mohr Envelope

HUANG Xueyao<sup>1,2</sup>, CHEN Shuping<sup>1,2,\*</sup>, WANG Zhongyu<sup>1,2</sup>, XING Ruixiu<sup>1,2</sup>, WANG Zhihui<sup>1,2</sup>,  
HU Yemei<sup>1,2</sup>, ZHOU Yujie<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;  
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;  
3. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Denudation thickness restoration plays a critical role in structural geology and petroleum exploration, as the intensity of stratal removal governs the geometric morphology of residual fault surfaces in arcuate normal faults. When a faulting criterion that defines fault surface geometry is known, denudation thickness can be quantified from preserved fault segments. Guided by the parabolic Mohr envelope theory, this study derives an algebraic relationship between fault surface dip angle and depth, and establishes a quantitative formula for denudation thickness based on residual fault geometry. The method is applied to the unconformity between the Cenozoic and the underlying strata of the Jiyang Depression. Firstly, an analytical expression for fault surface morphology is developed using experimentally determined rock mechanical parameters. The model is then vali-

收稿日期: 2025-08-18; 修回日期: 2026-01-07; 编辑: 李龚健。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172138)。

作者简介: 黄学尧, 男, 博士研究生, 1998年出生, 构造地质学专业, 主要从事油区构造解析。Email: 1792294395@qq.com。

\*通信作者: 陈书平, 男, 教授, 1965年出生, 构造地质学专业, 主要从事油区构造解析。Email: csp21c@163.com。

引用格式: 黄学尧, 陈书平, 王中昱, 等. 基于抛物线型莫尔包络线的弧形正断层区剥蚀量计算新方法 [J]. 现代地质, 2026, 40 (3): 939-948. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508180016.

HUANG Xueyao, CHEN Shuping, WANG Zhongyu, et al. A New Method for Estimating Denudation Thickness in Arcuate Normal Fault Zones Based on a Parabolic Mohr Envelope [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40 (3): 939-948. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508180016.

dated using two well-defined points on the residual fault surface. Finally, the denudation thickness associated with the unconformity is calculated. The derived dip-depth relationship not only provides a theoretical explanation for the formation of arcuate normal faults but also offers a novel geometric approach for quantifying denudation.

**Key words:** fault criterion; mechanical parameter; normal fault; denudation thickness; Jiyang Depression

## 0 引言

不整合是地壳上重要的地质现象,不整合形成过程反映了地壳运动的历史,不整合剥蚀量则在含油气盆地模拟中具有重要意义。关于剥蚀量的计算方法是地质学者一直在探索的课题<sup>[1-2]</sup>,但还没有提出一种能够适用于所有地质环境的计算方法。近年来关于断裂研究<sup>[3-4]</sup>给剥蚀量计算带来了启发,同时,也为盆地普遍存在的弧形或铲式断面的理解提供了参考。

目前有很多常用的剥蚀量计算方法<sup>[5-6]</sup>,包括镜质体反射率法<sup>[7]</sup>、磷灰石裂变径迹法<sup>[8-9]</sup>、流体包裹体法<sup>[10]</sup>、地层厚度趋势法<sup>[11]</sup>、沉积速率法、盆地波动分析法<sup>[12-14]</sup>、测井声波时差法<sup>[15]</sup>、孔隙度法<sup>[16]</sup>、天然气平衡浓度法和宇宙成因核素法<sup>[1]</sup>等。在实际应用中,往往在特定情况下选取某一种或几种方法进行剥蚀量恢复,且不同方法存在较大差异。

伸展盆地普遍存在弧形断层,不仅使我们想到利用抛物线型断裂准则来解释断面形态<sup>[3]</sup>,同时也使我们想到根据残留断层片段来预测剥蚀量的可行性<sup>[4]</sup>。约束地壳岩石断裂的断裂准则有多个<sup>[17]</sup>,但没有任何一个准则能解释地壳上所有的断裂现象。地壳变形是库伦摩擦行为,表现为脆性断裂或摩擦滑动<sup>[18-21]</sup>,典型的破裂准则包括直线型的<sup>[22]</sup>和抛物线型的,或者库伦-格里菲斯准则<sup>[20]</sup>。先存断裂的再活动适合摩擦滑动准则<sup>[23-25]</sup>,地壳深部韧性环境适合最大有效力矩准则<sup>[26]</sup>,其破裂包络线为反倾斜直线<sup>[27]</sup>。地壳不同深度岩石,由于温压条件不同,断裂准则不同,库伦准则适合解释具有一定围压环境下的剪破裂,格里菲斯准则适合解释伸展环境中的张破裂<sup>[27]</sup>。脆性地壳的大多数岩石,认为其破裂符合库伦-格里菲斯准则<sup>[4, 20]</sup>。

在抛物线型莫尔包络线理论的约束下,断层的形态表现为铲式,断层的发育具有一定的起弯深度<sup>[3-4]</sup>,在起弯深度之上,断层发育一定深度

的垂直段,起弯深度对应的是抛物线型莫尔包络线与岩石破裂的应力莫尔圆在顶点的一个交点。前人已通过物理模拟实验探讨了内聚力大小对垂直段是否发育以及对垂直段深度的影响<sup>[4]</sup>,结果显示无内聚力或内聚力较低的情况下不发育垂直段,内聚力较大的情况下断裂发育一定深度的垂直段。因此垂直段的发育对于发生在盆地基底的断层可能是适用的,因为那些岩石经历了长时间的压实成岩作用,内聚力较大。当剥蚀作用发生后,假定无压实作用、无断块旋转,现今残存断面的形态与理论断面形态对比所缺失的部分即为剥蚀量。

为进一步研究断裂准则对断面形态的约束和断面形态与剥蚀量的关系,本文以抛物线型莫尔包络线理论为指导,推导弧形正断层理论断面形态公式。以济阳坳陷实测岩石力学参数对公式进行赋值并验证了该公式在济阳坳陷具有不错的适用性,基于这一公式得到了济阳坳陷新生界地层与下伏地层不整合面的剥蚀量。本文根据抛物线型莫尔包络线理论所推导出的断面形态公式对伸展区构造恢复和油气勘探具有重要意义,同时对理解伸展区正断层断面形态方面 also 具有重要的理论意义。

## 1 抛物线型地壳岩石断裂理论

当岩石强度用抛物线型莫尔包络线表示时<sup>[4]</sup>,其公式为:

$$\tau^2 = X^2 T_0 (\sigma + T_0) \quad (1)$$

式中, $T_0$ 为单轴拉张强度(抗张强度), $\tau$ 和 $\sigma$ 为断裂面上的剪应力和正应力。 $X$ 是内聚力(抗剪强度)与单轴拉张强度的比值,即 $X = \frac{\tau_0}{T_0}$ ,对于一定材料来说是常数。当 $X=2$ 时,即为格里菲斯准则。

当断裂发生时,最大主应力 $\sigma_1$ 与最小主应力 $\sigma_2$ (压为正,张为负)的差应力较小时形成纯张断裂,对应图1中的小圆,交点为抛物线的顶点。差应力中等及以上时形成张-剪过渡性断裂,差应力较大时形成纯剪断裂<sup>[21]</sup>,这时对应莫尔圆与抛物线具有两个相切的交点。

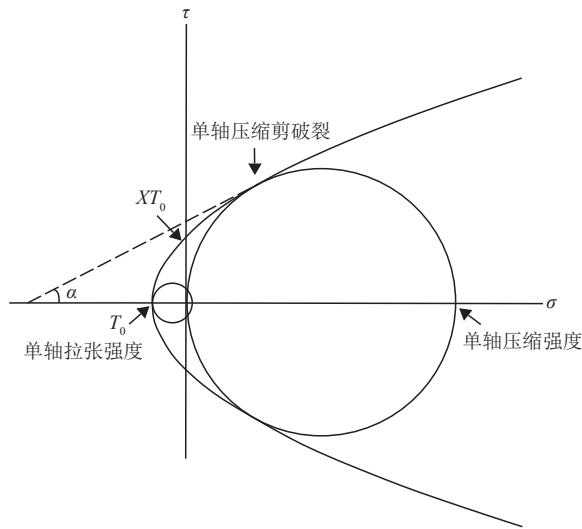


图1 抛物线型岩石破坏准则

Fig. 1 Parabolic rock failure criterion

$\tau$ . 剪应力, 单位为 MPa;  $\sigma$ . 正应力, 单位为 MPa;  $T_0$ . 单轴拉张强度, 单位为 MPa;  $X$ . 内聚力与单轴拉张强度的比值;  $\alpha$ . 岩石内摩擦角

## 2 断面倾角与断面深度

通过对公式(1)求导, 得到抛物线型莫尔包络线上每一点的剪应力的变化率, 即抛物线的斜率, 同时做抛物线上该点切线与  $\sigma$  轴交于一点, 夹角为  $\alpha$ , 符合:

$$\tan \alpha = \pm \frac{T_0}{\sqrt{T_0 \sigma + T_0^2}} \quad (2)$$

$\alpha$  在这里就是内摩擦角, 莫尔剪破裂准则认为大多数材料的内摩擦角并不是一个固定的常数, 而是会随着岩石所处的环境发生变化<sup>[17]</sup>。对于正断层(图2), 其断面倾角与内摩擦角的关系为:

$$\theta = 45^\circ + \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

有  $\alpha = 2\theta - 90^\circ$ ,  $\theta$  为断面倾角。  $\beta$  为最大主应力与断裂面外法线的夹角, 有  $\beta = 45^\circ + \alpha/2$ ,  $\beta$  与  $\theta$  的大小是相等的。

将公式(2)两边平方化简得到断裂面的正应力与内摩擦角的关系为:

$$\sigma = T_0 \left( \frac{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \right) \quad (4)$$

根据二维应力莫尔圆图解分析, 断裂面上剪应力和正应力为:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\beta \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta \quad (6)$$

用  $\alpha$  替换公式(5)和(6)中的  $\beta$  得:

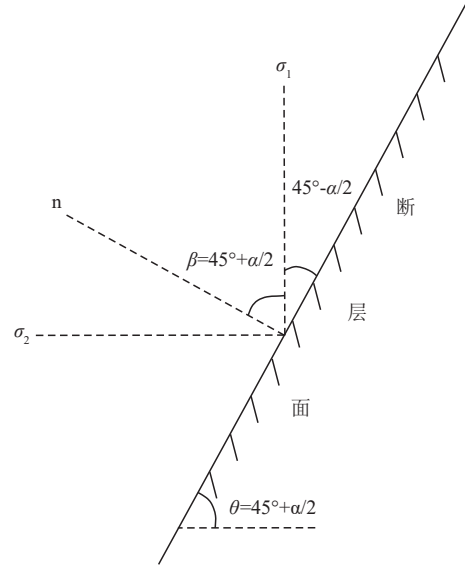


图2 正断层倾角及与最大主应力关系

Fig. 2 The dip angle of normal faults and their relationship with the maximum principal stress

$n$ —断裂面外法线

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos \alpha \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin \alpha \quad (8)$$

将公式(7)、(8)带入公式(1), 可以得到  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  的关系为:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 \cos^2 \alpha = 2X^2 T_0 [\sigma_1 (1 - \sin \alpha) + \sigma_2 (1 + \sin \alpha) + 2T_0] \quad (9)$$

理想状态下, 地下深处断裂面上最大主应力  $\sigma_1$  为重力应力, 有:

$$\sigma_1 = \rho gh \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为地下某一深度( $h$ )以上(假定密度均匀)岩石的密度( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  为重力加速度( $\text{m/s}^2$ ),  $h$  为对应的地下深度( $\text{m}$ )。

将公式(4)与公式(8)联立得到:

$$\sigma = T_0 \left( \frac{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \right) = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin \alpha \quad (11)$$

将公式(11)中的  $\cos \alpha$  用  $\sin \alpha$  代替, 并进一步化简得到:

$$2T_0 \left( \frac{1}{\sin^2 \alpha} - 2 \right) = \sigma_1 (1 - \sin \alpha) + \sigma_2 (1 + \sin \alpha) \quad (12)$$

通过对公式(12)进行求解可得  $\sigma_2$  的表达式为:

$$\sigma_2 = \frac{2T_0 \left( \frac{1}{\sin^2 \alpha} - 2 \right) - \sigma_1 (1 - \sin \alpha)}{1 + \sin \alpha} \quad (13)$$

将公式(13) $\sigma_2$ 的表达式代入公式(9)的右边进行化简得到:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2(1 - \sin^2 \alpha) = 2X^2 T_0 \left[ 2T_0 \left( \frac{1}{\sin^2 \alpha} - 2 \right) + 2T_0 \right] \quad (14)$$

对公式(14)进一步化简得到:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2XT_0 \frac{1}{\sin \alpha} \quad (15)$$

将公式(13) $\sigma_2$ 的表达式代入公式(15)得到 $\sigma_1$ 的表达式为:

$$\sigma_1 = T_0 \left( \frac{1}{\sin^2 \alpha} - 2 \right) + XT_0 \left( \frac{1}{\sin \alpha} + 1 \right) \quad (16)$$

对公式(16)进一步化简得到:

$$\sigma_1 = T_0 \frac{(X-2)\sin^2 \alpha + X\sin \alpha + 1}{\sin^2 \alpha} \quad (17)$$

将公式(10)和公式(17)两个公式联立得到:

$$\rho gh = T_0 \frac{(X-2)\sin^2 \alpha + X\sin \alpha + 1}{\sin^2 \alpha} \quad (18)$$

用公式(3)将公式(18)中的内摩擦角 $\alpha$ 用断面倾角 $\theta$ 代替,可以得到断面倾角与断面深度的最终关系式为:

$$h = \frac{T_0}{\rho g} \times \frac{(X-2)\sin^2(2\theta - 90^\circ) + X\sin(2\theta - 90^\circ) + 1}{\sin^2(2\theta - 90^\circ)} \quad (19)$$

但是,由于存在垂直段<sup>[3-4]</sup>,垂直段断层的倾角为 $90^\circ$ ,不符合公式(19)。该垂直段的深

度为<sup>[4]</sup>:

$$H = T_0 [(C_0/T_0)^2 - 1] / \rho g = T_0 (X^2 - 1) / \rho g \quad (20)$$

式中: $T_0$ 为单轴拉张强度, $C_0$ 为内聚力, $\rho$ 为岩石密度, $g$ 为重力加速度。

垂直段深度 $H$ 处的最大主应力:

$$\sigma_1 = \rho g H = T_0 (X^2 - 1) \quad (21)$$

将公式(17)与公式(21)联立可得:

$$\frac{(X-2)\sin^2 \alpha + X\sin \alpha + 1}{\sin^2 \alpha} = X^2 - 1 \quad (22)$$

根据公式(22)可以得出垂直段深度 $H$ 处岩石的内摩擦角 $\alpha$ 只与岩石的内聚力和单轴拉张强度有关,是一个定值。

### 3 剥蚀量计算方法

根据公式(20),当单轴拉张强度( $T_0$ )一定时,内聚力较大( $C_0/T_0 > 1$ )则断层发育垂直段,内聚力较小( $C_0/T_0 \leq 1$ )则断层不发育垂直段。以断层发育垂直段为例,假设地层沉积之后(图3(a))发生断裂活动,发育一条边界断层F(图3(b)),符合抛物线型断裂准则,断面形态表现为上部垂直段和下部弧形段。断裂活动发生之后,边界断层不旋转,且地层经过长期成岩作用,压实可忽略。如果发生地层抬升剥蚀作用,现今残存断面形态为理论断面形态减去剥蚀掉的断面形态(图3(c));如果不发生剥蚀继续接受沉积,则原先形成的理论断面形态保持不变(图3(d))。若无压实,无断块旋转,认为断裂的后期复活和持续活动不影响

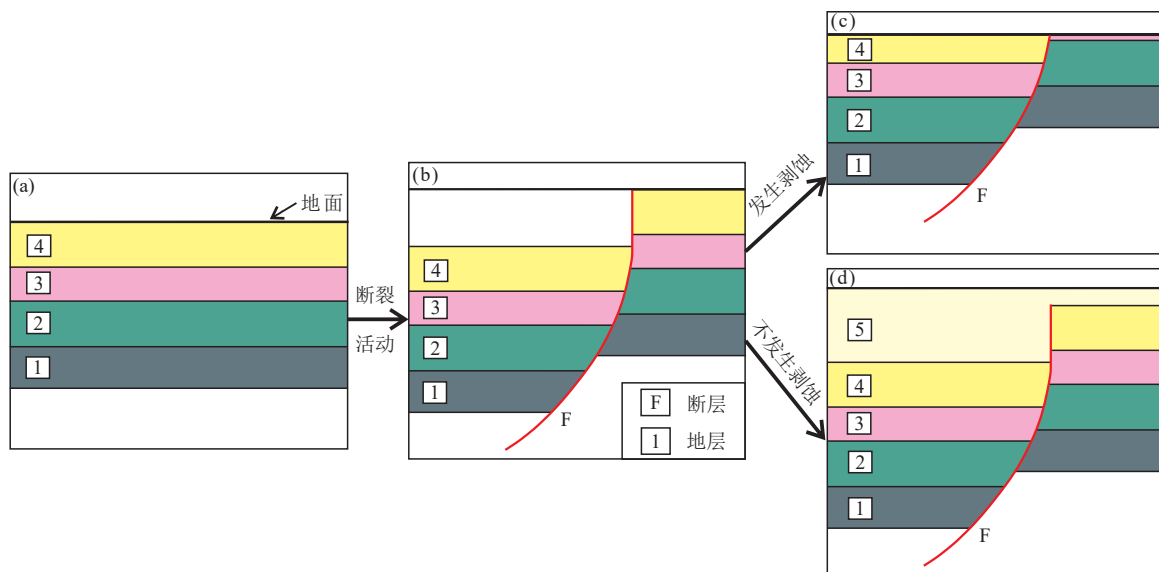


图3 剥蚀作用是否发生对断面形态影响的理论对比模型

Fig. 3 Theoretical comparative model of the influence of denudation occurrence on fault surface morphology

(a) 初始沉积阶段;(b) 断裂后断面初始形态;(c) 剥蚀后现今残余断面形态;(d) 未剥蚀现今断面形态

先存断面的形态。根据图3剥蚀前后的理论模型,联合公式(19)、(20)即可反推剥蚀量,具体流程为在断层符合抛物线型断裂准则的条件下,根据研究区的岩石力学参数可以得到断面的理论形态,现今残存断面形态的埋藏深度与理论断面形态的埋藏深度进行对比,可以得到被剥蚀断面的埋藏深度,即为剥蚀量。

剥蚀量计算方法如下,如果不整合面与断层下盘接触点处的断面实测倾角为 $90^\circ$ 或接近 $90^\circ$ ,说明残留一部分垂直断面,假设垂直段最大深度为 $H$ ,剩余垂直段深度为 $H_1$ ,此时断层剥蚀量为垂直段最大深度与现今保存的垂直段深度的差值,即剥蚀量 $=H-H_1$ 。如果不整合面与断层下盘接触点处的断面实测倾角为 $\theta_H$ (弧形段初始倾角),则剥蚀量 $=H$ 。如果不整合面与断层下盘接触点处的断面实测倾角为 $\theta_1$ ,且 $\theta_1 < \theta_H$ (弧形段初始倾角),根据公式(19)可以得到 $\theta_1$ 处的深度 $H_2$ ,此时剥蚀量 $=H_2$ (图4)。

#### 4 济阳拗陷实例应用

济阳拗陷位于渤海湾盆地南部,是中生代和新生代发育而成的断—坳叠合型伸展盆地<sup>[28-29]</sup>,拗陷内发育了许多铲式断层,断层主要形成于新生代<sup>[30-31]</sup>,也有部分断层形成于中生代并在新生代继承性活动。济阳拗陷新生代盆地基底由中生界碎屑岩、古生界碎屑岩和碳酸盐岩以及太古界花岗岩组成<sup>[32]</sup>,岩石固结程度高,内聚力大,压实可忽略。拗陷内边界断层没有经历大规模断块旋转,断层下盘比较稳定,所保留下来的弧形断面可以反映原始断面形态。因此济阳拗陷新生界地层与下伏地层的不整合可以尝试利用公式(19)建立断面形态方程和计算剥蚀量。

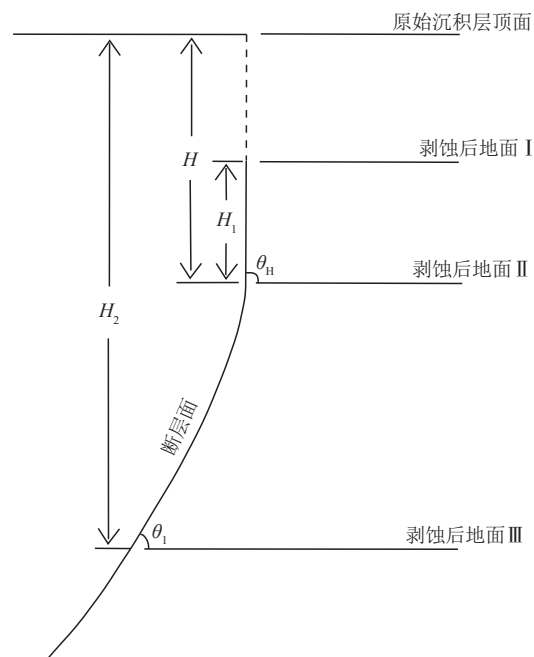


图4 正断层产状与剥蚀量关系

Fig. 4 Relationship between normal fault occurrence and denudation thickness

根据济阳拗陷南部鲁西隆起野外露头的岩石采样进行岩石力学性质实验,对不同岩石样本的密度、内聚力和单轴拉张强度进行测试,得到一系列济阳拗陷内的地层岩石样本实测数据(表1)。测试结果结合前人所测得不同岩性地层的岩石特征和力学参数<sup>[33-40]</sup>,对公式(19)进行赋值,验证其在济阳拗陷的适用性。

根据实测数据,对上述理论公式进行赋值,使其符合济阳拗陷的地层断裂情况。首先对内聚力与单轴拉张强度的比值( $C_0/T_0$ )进行投点分析(图5),发现 $C_0/T_0$ 的值约为3。

将 $X=3$ 代入公式(1)可以写出济阳拗陷抛物线型莫尔包络线的方程为:

表1 岩石力学参数统计表

Table 1 Statistical table of rock mechanics parameters

| 样品 | 采样点  | 地层及岩性               | 密度(g/cm <sup>3</sup> )    | 实测内聚力 $C_0$ (MPa)     | 实测单轴拉张强度 $T_0$ (MPa)  | $C_0/T_0$ |
|----|------|---------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| 1  | 野外露头 | K <sub>2</sub> 砂岩   | 2.63                      | 30.08                 | 10.41                 | 2.89      |
| 2  | 野外露头 | K <sub>1</sub> 砂岩   | 2.26                      | 11.74                 | 2.50                  | 4.70      |
| 3  | 野外露头 | K <sub>2</sub> 砂岩   | 2.02                      | 3.36                  | 1.11                  | 3.03      |
| 4  | 野外露头 | J <sub>2-3</sub> 砂岩 | 2.42                      | 31.82                 | 8.41                  | 3.78      |
| 5  | 野外露头 | C <sub>2</sub> 砂岩   | 2.49                      | 24.98                 | 8.96                  | 2.79      |
| 6  | 野外露头 | P <sub>1</sub> 砂岩   | 2.45                      | 22.76                 | 6.87                  | 3.31      |
| 7  | 文献调研 | 花岗岩                 | 2.64~2.68 <sup>[36]</sup> | 35.11 <sup>[34]</sup> | 10.68 <sup>[36]</sup> | 3.29      |

注:样品1-6的岩石力学参数为实测结果,样品7的岩石力学参数来自文献调研。

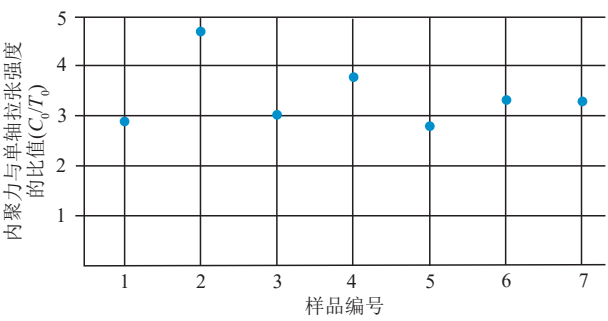


图5  $C_0/T_0$ 数值分布点图

Fig. 5 Dot plot of  $C_0/T_0$  numerical distribution

$$\tau^2 = 9T_0(\sigma + T_0) \tag{23}$$

根据公式(23)可以得到符合济阳坳陷的抛物线型岩石破坏准则示意图(图6)。将 $X = 3$ 代入公式(22)计算得到垂直段深度 $H$ 处 $\sin\alpha = 0.65$ , 内摩擦角 $\alpha = 40.5^\circ$ , 断层弧形段初始倾角由公式(3)计算得出 $\theta_H = 65.25^\circ$ 。

在济阳坳陷内选取两条剖面对抛物线型莫尔包络线求取剥蚀量的方法进行实际应用。根据胜利油田提供的地震剖面对埕南断层和临商断层进行断裂解释(图7(a)和8(a)), 并根据时深关系编制地质剖面图(图7(b)和8(b))。

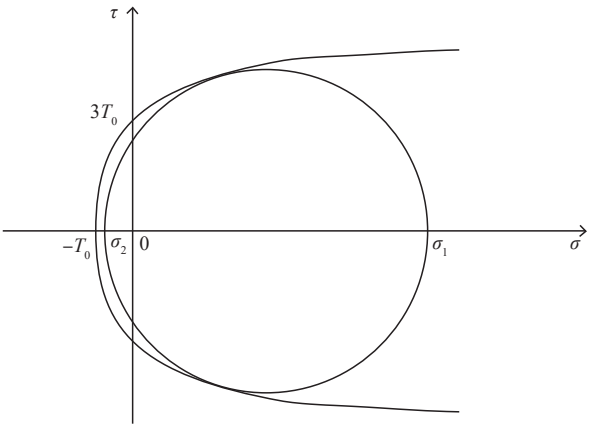


图6 济阳坳陷抛物线型岩石破坏准则

Fig. 6 The parabolic rock failure criterion for the Jiyang Depression

4.1 应用于埕南断层

利用抛物线型莫尔包络线正断层剥蚀量的求取方法, 选取济阳坳陷616测线剖面(图7(a)和(b)), 图中可以看出埕南断层南部沉积地层较为完整, 而断层北部不整合面之上缺失中生界和新生界的地层, 因此选取埕南断层作为研究对象进行剥蚀量计算, 并与前人所使用的其他方法进行对比, 以此来验证该方法的准确性。

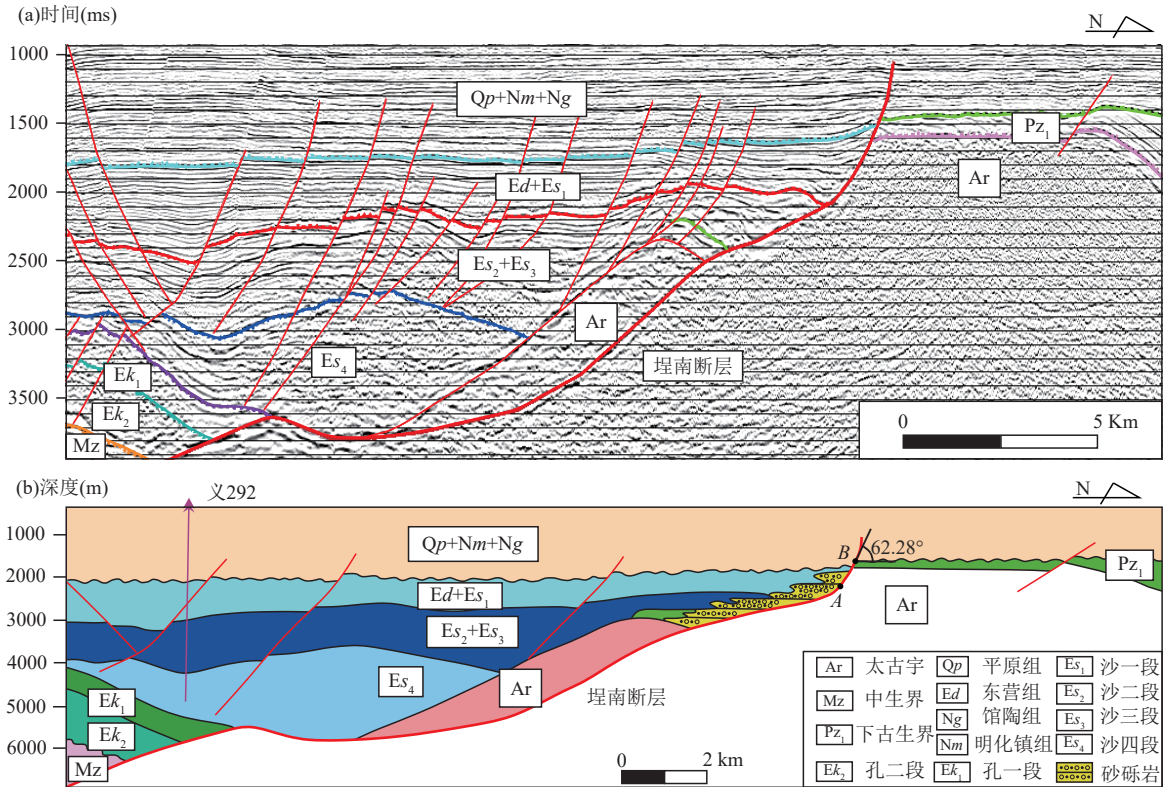


图7 济阳坳陷616测线地震剖面与地质剖面图

Fig. 7 Seismic profile and geological profile of line 616 in the Jiyang Depression

(a) 地震剖面图; (b) 地质剖面图

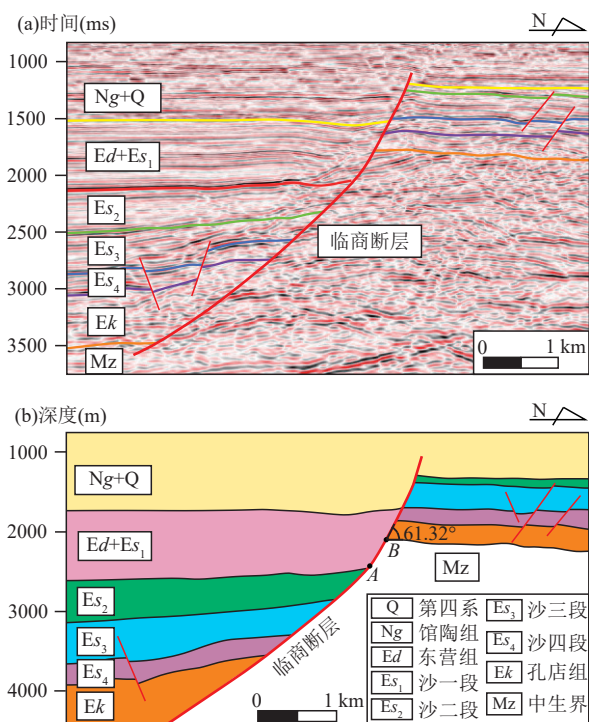


图8 惠民凹陷中央隆起带盘河地区地震剖面与地质剖面图

Fig 8 Seismic profile and geological profile of Panhe area in the Central Uplift Belt of Huimin Sag

(a) 地震剖面图; (b) 地质剖面图

根据表1实测数据资料, 取埕南断层下盘不整合面地层的内聚力与单轴拉张强度的比值  $X = 3$ , 密度  $\rho = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 重力加速度  $g = 10 \text{ N/kg}$ , 单轴拉张强度  $T_0 = 6 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。

为验证埕南断层是否符合抛物线型断裂公式, 在图7(b)中埕南断层残留断面上取点A, 测得其深度为2218 m, 断层倾角为  $58.85^\circ$ , 将A点倾角数据代入公式(19)得到A点断面理论深度为2858.4 m; 埕南断层残留断面与不整合面的交点为点B, 测得其深度为1627.6 m, 断层倾角为  $62.28^\circ$ , 将B点倾角数据代入公式(19)得到B点断面理论深度为2256.4 m。A、B两点现今实际深度差值为590.4 m, 理论深度差值为602 m。实际深度与理论深度的误差为11.6 m, 相对误差在可接受范围内, 埕南断层A、B两点之间的断面形态符合抛物线型断裂公式。

埕南断层下盘不整合面的断面倾角即B点倾角  $\theta_1 = 62.28^\circ$  (图7(b))。  $\theta_1 < \theta_H$ , 因此没有残留垂直段, 根据公式(19)得到的B点不整合面理论深度为2256.4 m, 即为剥蚀厚度。

前人用声波时差法求得埕南断层附近古生界

与新生界地层的不整合面剥蚀厚度为2900 m, 用磷灰石裂变径迹法求得埕南断层附近古生界与新生界地层的不整合面剥蚀厚度为2690 m<sup>[5]</sup>, 前人计算结果与本次计算结果相近。

## 4.2 应用于临商断层

为进一步验证该方法的可行性, 选取临商断层进行剥蚀量分析。临商断层位于济阳拗陷惠民凹陷西部, 其下盘为盘河地区, 根据盘河地区剖面图(图8(a)和(b)), 使用抛物线型莫尔包络线计算剥蚀量的公式对临商断层中生界—新生界不整合面的剥蚀量进行计算。

首先要确定临商断层中生界—新生界不整合面以下断面形态是否符合抛物线型断裂公式。根据表1岩石测试数据, 取临商断层下盘不整合面地层的内聚力与单轴拉张强度的比值  $X = 3$ , 密度  $\rho = 2.26 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 重力加速度  $g = 10 \text{ N/kg}$ , 单轴拉张强度  $T_0 = 2.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。

为验证临商断层中生界—新生界不整合面以下断面形态是否符合抛物线型断裂公式, 在图8(b)临商断层残留断面上取点A, 测得其深度为2425.2 m, 断层倾角为  $57.66^\circ$ , 将A点的倾角代入公式(19)计算得到A点的理论深度为1494.2 m。临商断层残存断面与不整合面交点为B点, 测得其深度为2096.7 m, 断层倾角为  $61.32^\circ$ , 将B点的倾角代入公式(19)计算得到B点的理论深度为1106.9 m。A、B两点之间的现今深度差为328.5 m, 理论差值为387.3 m, 实际深度与理论深度的误差为58.8 m, 误差率为15%, 误差较小, 认为临商断层A、B两点之间的断面形态符合抛物线型断裂公式。临商断层下盘不整合面的断面倾角即B点倾角  $\theta_1 = 61.32^\circ$  (图8(b))。  $\theta_1 < \theta_H$ , 因此没有残留垂直段, 根据公式(19)得到的B点不整合面理论深度为1106.9 m, 即为剥蚀厚度。前人利用其他剥蚀量计算方法求得惠民凹陷中央隆起带附近侏罗系—白垩系顶部地层剥蚀厚度为1500 m左右<sup>[5]</sup>, 与本文计算结果相近。

## 5 误差分析

在抛物线型莫尔包络线理论下, 得到的铲式正断层断面倾角与断面深度的最终关系式即公式(19)适用于理想情况下, 但实际情况往往更为复杂。压实作用、断块旋转、地层岩性等因素都会对理论断面形态造成不同程度的影响, 导致实

际地层剥蚀情况与理论计算值产生误差。

压实作用是沉积物在重力作用下使孔隙减小、厚度变小的过程。理论断面形成后(图9(a))经过抬升剥蚀作用会保留部分残存断面,残存断面顶点与底点的垂向深度差为 $L_1$ (图9(b)),若不受压实、没有断块旋转,则残存断面形态不会发生改变。若后续经历沉积压实过程,压实作用会导致残存断面形态在垂向上压缩变缓,此时残存断面的垂向深度差为 $L_2$ (图9(c)), $L_2 < L_1$ ,因此会导致剥蚀量计算结果偏大。由于埋藏过程中压实作用的影响,现今的地层格架并不能真实反映各地层单元的原始厚度及其随时间演化的累积埋深。因此,为准确评估剥蚀量,必须对压实后的地层进行去压实校正,以恢复其原始厚度。通常情况下,根据孔隙度随深度的演化规律,通过反演方法可重建该地层沉积时的原始厚度<sup>[41]</sup>。将现今断面上每一点的埋深利用上述方法进行去压实校正可以得到断面上每一点的原始埋深,进而可以得到去压实校正后的断面形态,将校正后断面的倾角数据代入公式(19)可以得到去压实校正后的剥蚀量计算结果。压实作用对埋藏较浅、年代较新的沉积岩层影响较大,但是对于埋藏较深、年代古老的沉积岩层以及诸如碳酸盐岩等的化学岩、岩浆岩和变质岩的影响较小<sup>[12-13]</sup>。本次研究的断层主要发育在古生界碳酸盐岩以及太古界花岗岩上,压实作用可以忽略。

断块旋转作用也是误差来源之一,如果发生断块旋转活动,会有两种情况,一种情况为断块

向断层倾向方向旋转,残存断面形态被改变后的垂向深度差为 $L_3$ (图9(d)), $L_3 > L_1$ ,因此会导致剥蚀量计算结果偏小;另一种情况为断块向断层倾向的反方向旋转,残存断面形态被改变后的垂向深度差为 $L_4$ (图9(e)), $L_4 < L_1$ ,因此会导致剥蚀量计算结果偏大。在选择断层进行剥蚀量计算时,应尽量选择下盘地层近水平、上盘地层没有牵引变形的不发生断块旋转的断层,若有断块旋转则根据不整合面下伏地层产状进行反旋转恢复,以减小断块旋转造成的误差。

地层非均质性也是可能的误差来源。由于实际地层具有非均质性,不同地层的垂向分布不同,地层岩性也有差异。断层发育初始阶段,由于不同岩性地层岩石力学性质有差异,断层在不同地层发育时的断面形态可能会不同,随着断裂活动的持续进行,不同地层的初始断面形态会发生改变,并逐渐成为统一的断层面。当断面形态受岩性影响较大时,可对应不同岩性将断层分为多段,不同段采用不同岩性的岩石力学参数对公式进行赋值,来恢复断面形态和计算剥蚀量。

综上所述,公式(19)适用于无压实、无断块旋转的理想地质条件。在实际应用中,若研究区存在压实效应或断块旋转,需首先对地层进行去压实校正,并合理恢复断块的原始几何形态,方可获得可靠的剥蚀量恢复结果。尽管适用条件受限,该方法仍为理解盆地中广泛发育的弧形或铲式正断层断面形态提供了理论参考,并在剥蚀量定量恢复方面提出了一种新的可行途径。

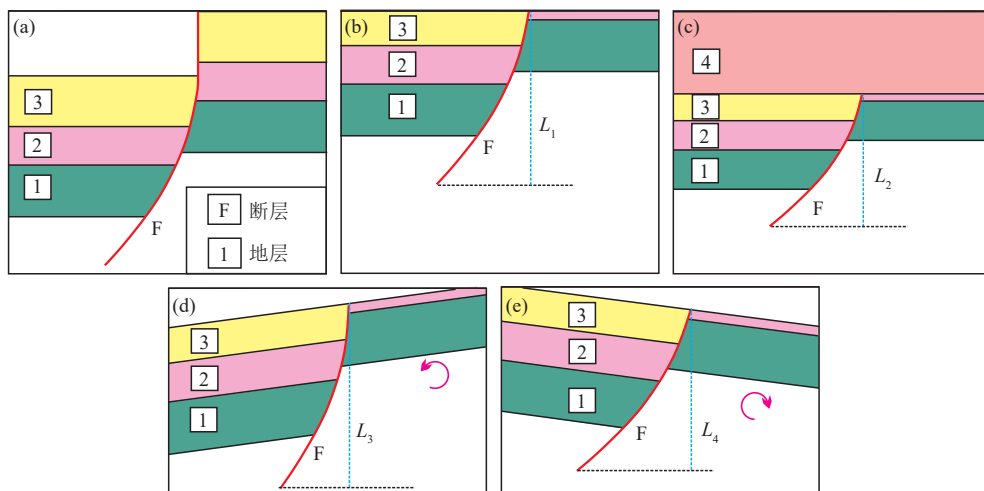


图9 压实作用与断块旋转引起剥蚀量计算误差示意图

Fig. 9 Schematic diagram of denudation thickness calculation error caused by compaction and fault block rotation

(a) 断面初始形态;(b) 剥蚀后残存断面形态;(c) 压实后断面形态;(d) 断块向断层倾向方向旋转后断面形态;(e) 断块向断层倾向反方向旋转后断面形态

## 6 结 论

(1)根据抛物线型莫尔包络线的表达式与断面应力表达式,通过公式推导得到了铲式正断层理论断面在地下深处某一点的断面倾角与深度的关系。根据济阳坳陷的岩石测试数据对推导出的公式进行赋值并在残留断面上取点验证,发现这一关系式能够很好的解释济阳坳陷新生代盆地基底内的断面形态。

(2)理想状态下铲式正断层由上部垂直段和下部弧形段组成,垂直段深度及断面倾角由公式计算得出。应用这一方法可以得到济阳坳陷埕南断层古生界—新生界不整合面的剥蚀量为2256.4 m,临商断层中生界—新生界不整合面的剥蚀量为1106.9 m。剥蚀量计算结果与前人使用其他方法得到的相同地区剥蚀厚度数值相近。

(3)地层岩性不同,其测试数据会直接影响 $X$ 的值,从而影响断面形态和垂直段深度的计算结果;压实作用会导致剥蚀量的计算结果偏大;断块旋转对剥蚀量结果的影响取决于断块旋转方向。实际应用中可以使用断层分段处理、断块反旋转恢复和去压实校正等方法来减小误差。

## 参考文献:

- [1] 袁玉松,郑和荣,涂伟. 沉积盆地剥蚀量恢复方法[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 636–642.
- [2] 久凯,丁文龙,李春燕,等. 含油气盆地古构造恢复方法研究及进展[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(1): 13–19.
- [3] 宋随宏,陈书平,何明宇. 上拱力背景下正断裂剖面形态及极限应力状态研究[J]. 地质力学学报, 2012, 18(2): 149–157.
- [4] ABDELMALAK M M, BULOIS C, MOURGUES R, et al. Description of new dry granular materials of variable cohesion and friction coefficient: Implications for laboratory modeling of the brittle crust[J]. Tectonophysics, 2016, 684: 39–51.
- [5] 李伟,吴智平,周瑶琪. 济阳坳陷中生代地层剥蚀厚度、原始厚度恢复及原型盆地研究[J]. 地质论评, 2005, 51(5): 29–38.
- [6] 张鹏飞,刘金华,孟涛,等. 断陷盆地复杂断裂区古构造恢复: 以渤海湾盆地济阳坳陷渤南洼陷沙四下亚段为例[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(11): 1973–1982.
- [7] 宋明水. 济阳坳陷中、新生代成熟度曲线及其在剥蚀量计算中的运用[J]. 高校地质学报, 2004, 10(1): 121–127.
- [8] 马泽良,何治亮,罗开平,等. 青藏高原南羌塘坳陷白垩纪以来的隆升剥蚀历史: 来自低温热年代学的约束[J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 75–86.
- [9] FYHN M B W, GREEN P, HOANG B H, et al. Late Cretaceous and Cenozoic denudation of northern Central Vietnam examined through apatite fission track analysis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2025, 282: 106524.
- [10] 刘斌. 利用流体包裹体计算地层剥蚀厚度: 以东海盆地3个凹陷为例[J]. 石油实验地质, 2002, 24(2): 172–176, 180.
- [11] 尚尧. 构造变形趋势法在乌尔逊凹陷地层剥蚀量恢复中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(3): 15–19.
- [12] 金之钧,张一伟,刘国臣,等. 沉积盆地物理分析: 波动分析[J]. 地质论评, 1996, 42(S1): 170–180.
- [13] 张一伟,金之钧,刘国臣,等. 塔里木盆地环满加尔地区主要不整合形成过程及剥蚀量研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 449–457.
- [14] 王中显,陈书平,张瑞,等. 准噶尔盆地达坂城次凹陷沉积波动过程及对白垩系剥蚀的揭示[J]. 地学前缘, 2026, 33(2): 503–514.
- [15] 尚高峰,尉小龙,宋哲,等. 声波测井法计算剥蚀厚度在十红滩地区的应用[J]. 铀矿地质, 2012, 28(5): 307–310, 306.
- [16] 郭颖,倪金龙. 利用等效孔隙度法恢复沉积盆地残余地层古厚度: 以济阳坳陷惠民凹陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(3): 42–45, 113–114.
- [17] ZANG A, STEPHANSSON O. Stress Field of the Earth's Crust[M]. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2010.
- [18] DAVIS D, SUPPE J, DAHLEN F A. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1983, 88(B2): 1153–1172.
- [19] XIAO H B, DAHLEN F A, SUPPE J. Mechanics of extensional wedges[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1991, 96(B6): 10301–10318.
- [20] Fossen H. Structural Geology, 2nd edition[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [21] CHEN S P. On the occurrences of fractures in wrench zones[J]. World Journal of Mechanics, 2020, 10(3): 27–38.
- [22] KOHLSTEDT D L, EVANS B, MACKWELL S J. Strength of the lithosphere: Constraints imposed by laboratory experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995, 100(B9): 17587–17602.
- [23] BYERLEE J. Friction of rocks[J]. Pure and applied geophysics, 1978, 116(4): 615–626.
- [24] CHEN S P, XU S S, WANG D R, et al. Effect of block rotation on fault sealing: An example in Dongpu sag, Bohai Bay basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 39(1): 39–47.
- [25] 童亨茂,张宏祥,侯泉林,等. 广义破裂活动准则[J]. 地质力学学报, 2024, 30(1): 3–14.
- [26] ZHENG Y D, WANG T, MA M B, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(2): 271–285.
- [27] 侯泉林,程南南,石梦岩,等. 不同构造层次岩石变形准则的融合与发展[J]. 岩石学报, 2018, 34(6): 1792–1800.
- [28] 任建业,于建国,张俊霞. 济阳坳陷深层构造及其对中新世盆地发育的控制作用[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 117–137.
- [29] 汤梦静,王毛毛,贾红义,等. 渤海湾盆地惠民凹陷滚动背

- 斜与顶部垮塌断层形成的构造物理模拟[J]. 地质通报, 2023, 42(9): 1505 – 1515.
- [30] 束青林, 赵辉, 姜在兴, 等. 渤海湾盆地惠民凹陷商河地区古近系沙四上亚段滩坝沉积特征[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1232 – 1242.
- [31] 穆星, 孟涛, 石泉清, 等. 济阳拗陷太古宙基岩储层特征及油气成藏模式[J]. 现代地质, 2025, 39(3): 787 – 800.
- [32] 何晓, 牛花朋, 赵贤, 等. 基于数值模拟表征岩石组构对裂缝性储层发育影响程度的机理研究: 以济阳拗陷花岗岩质岩石为例[J]. 地学前缘, 2025, 32(5): 361 – 376.
- [33] 郝运轻, 宋国奇, 周广清, 等. 济阳拗陷古近系泥页岩岩石学特征对可压性的影响[J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 489 – 495.
- [34] 周朝兰, 李斌, 许梦国. 高应力下花岗岩抗剪强度参数特征试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(2): 58 – 63.
- [35] 杨元江, 邓昌州, 李成禄, 等. 小兴安岭翠峦地区早侏罗世A型花岗岩成因与动力学背景[J]. 现代地质, 2023, 37(6): 1597 – 1608.
- [36] 辛国旭, 邵保平, 杨欣欣, 等. 不同冷却模式下高温花岗岩力学特性演变规律试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(2): 267 – 275.
- [37] 赵裕达, 张文高, 刘昊, 等. 花岗岩侵位后的热应力时空演化及其影响因素[J]. 地质力学学报, 2024, 30(1): 38 – 56.
- [38] 马泽一林, 滕文航, 张嘉欣, 等. 冈底斯西段麦拉始新世I型花岗岩地球化学特征及其对新生下地壳拆沉作用的指示[J]. 现代地质, 2025, 39(6): 1496 – 1510.
- [39] 武将伟, 胡浩, 张富臣, 等. 内蒙古集宁地区小大青山中生代花岗岩岩石特征及其成因意义[J]. 现代地质, 2025, 39(4): 995 – 1015.
- [40] 张冠杰, 程奇, 张雷, 等. 渤海湾盆地渤中19-6气田变质岩潜山储层三维岩石力学参数求取及意义[J]. 地球科学, 2025, 50(2): 551 – 568.
- [41] 金之钧, 陈书平, 张瑞. 沉积盆地波动过程分析: 研究现状与展望[J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 284 – 296.