

先存隐伏断裂识别方法及应用

——以南海北部惠州 - 北卫滩断裂为例

李子涵¹, 胡俊成¹, 张慧敏², 杨雪², 罗均升¹, 万志峰¹, 邹兵¹

¹中山大学海洋科学学院, 广东 珠海

²中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳

收稿日期: 2025年9月4日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月24日

摘要

先存隐伏断裂是指形成于早期地质时期、后期被沉积物或岩层覆盖且可能再次活动的断裂构造。珠江口盆地惠州凹陷是我国南海北部重要的富生烃凹陷, 近年来随着盆地勘探领域逐步由浅层向深层转变, 先存隐伏断裂的形成演化及其控洼作用研究尤为重要, 其中惠州 - 北卫滩断裂是惠州凹陷西部典型的NW向先存隐伏断裂, 而目前对于断裂的识别标志、发育模式的认识极为不足。本文综合运用重磁异常与三维地震资料, 系统开展了隐伏断裂识别与构造解析研究, 总结了先存隐伏断裂的发育特征及其识别标志。惠州 - 北卫滩断裂在珠一坳陷发育位置在西江23洼东侧 - 惠州24洼 - 惠州26洼一带, 影响范围基本覆盖整个惠西地区, 向南延伸至南部低隆起东界。断裂于惠州凹陷内的地震剖面上发育“Y”字形构造及似花状构造。根据各时期断裂活动分析表明在古近系拉张应力由NW - SE向顺时针转变为N-S向的过程中, 断裂与应力方向夹角不断增大, 整体经历了前新生代先存形成 - 早文昌张扭活化 - 晚文昌继承活动 - 恩平期张性拓展的演化过程。同时, 惠州 - 北卫滩断裂在新生代的构造控制了惠西地区洼陷的构造样式与沉积迁移。

关键词

先存隐伏断裂, 识别标志, 惠州 - 北卫滩断裂, 南海北部

Identification Method and Application of Pre-Existing Hidden Faults

—A Case Study of the Huizhou-Beiweitan Fault in the Northern South China Sea

Zihan Li¹, Juncheng Hu¹, Huimin Zhang², Xue Yang², Junsheng Luo¹, Zhifeng Wan¹, Bing Zou¹

¹School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai Guangdong

²Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen Guangdong

文章引用: 李子涵, 胡俊成, 张慧敏, 杨雪, 罗均升, 万志峰, 邹兵. 先存隐伏断裂识别方法及应用[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(10): 1403-1412. DOI: 10.12677/ag.2025.1510130

Abstract

Pre-existing hidden faults refer to fault structures that formed in early geological periods, were later covered by sediments or rock layers, and may be reactivated. The Huizhou Sag in the Pearl River Mouth Basin is an important hydrocarbon-rich sag in the northern part of the South China Sea. In recent years, as the exploration scope of the basin has gradually shifted from shallow to deep layers, research on the formation and evolution of pre-existing hidden faults and their depression-controlling effects has become particularly important. Among these faults, the Huizhou-Beweitan Fault is a typical NW-trending pre-existing hidden fault in the western part of the Huizhou Sag. However, the current understanding of the fault's identification markers and development patterns is extremely insufficient. In this study, gravity-magnetic anomalies and 3D seismic data were comprehensively used to systematically conduct research on concealed fault identification and structural analysis, and the development characteristics and identification markers of pre-existing hidden faults were summarized. The Huizhou-Beweitan Fault is developed in the Zhu I Depression, distributed along the area from the east of Xijiang 23 subsag, through Huizhou 24 subsag to Huizhou 26 subsag. Its influence range basically covers the entire western Huizhou Sag and extends southward to the eastern boundary of the southern low uplift. On the seismic profiles within the Huizhou Sag, the fault develops "Y"-shaped structures and flower-like structures. Analysis of fault activity in various periods shows that during the Paleogene, when the extensional stress direction rotated clockwise from NW-SE to N-S, the angle between the fault and the stress direction increased continuously. The fault has undergone an evolutionary process of pre-Cenozoic pre-existing formation-early Wenchang Stage tensional-shear reactivation-late Wenchang Stage inherited activity-Enping Stage extensional expansion. Meanwhile, the activity of the Huizhou-Beweitan Fault in the Cenozoic controlled the structural patterns of sags and sedimentary migration in the western Huizhou Sag.

Keywords

Pre-Existing Hidden Faults, Identification Signs, Huizhou-Beiweitan Fault, Northern South China Sea

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

先存隐伏构造对裂谷演化的影响一直是全球关注的热点问题，这类断裂识别困难，但对区域地质构造、地貌演化、地震活动具有重要控制作用，同时显著影响盆地构造格局、沉积相带展布及油气藏的形成与分布[1] [2]。南海北部珠江口盆地在新生成盆之前发育 NE、NW 两组先存断裂，在盆地形成演化过程中 NW 向断裂隐伏发育，其典型特征表现为盖层中缺乏明清晰的断裂性质，但深部仍存在构造活动，其中南海北部珠江口盆地惠州凹陷西部的惠州 - 北卫滩断裂便是这种先存隐伏断裂。前人提出了惠州 - 北卫滩断裂，但对该断裂识别标志、发育模式及其演化过程的认识极为不足[3]-[5]。在目前南海北部油气勘探逐步从浅层向深层转变的阶段，先存隐伏断裂的研究显得尤为重要。

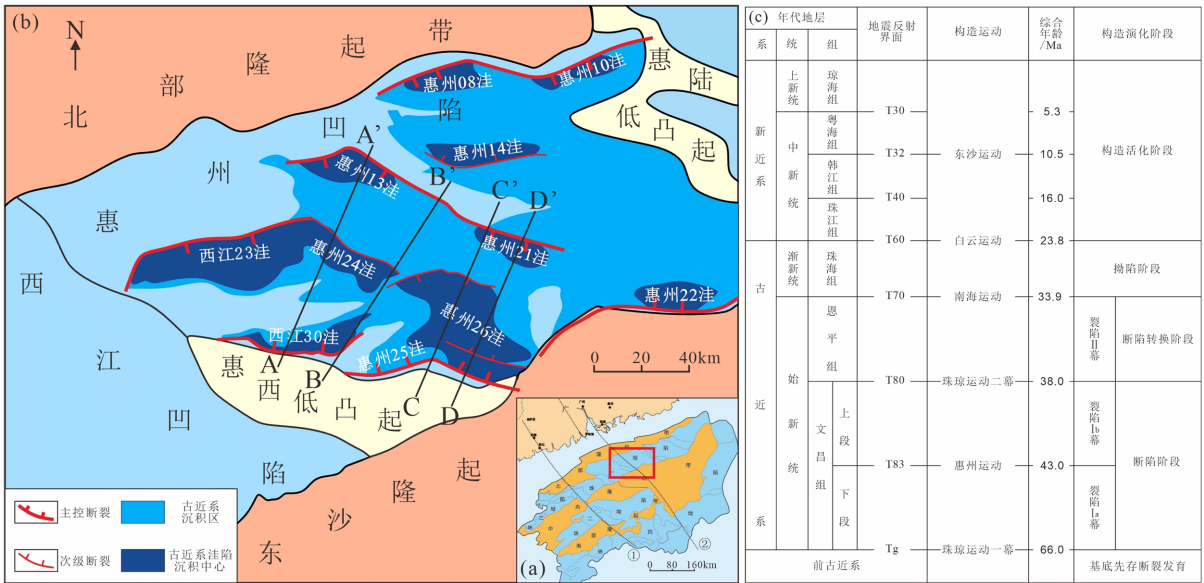
2. 先存隐伏断裂识别标志

先存隐伏断是指形成于早期地质时期、后期被沉积物或岩层覆盖，且可能再次活动的断裂构造。由于未直接出露地表，其识别需依赖野外踏勘、地球物理及地球化学等多学科方法。

先存隐伏断裂深层的标志可以通过重磁异常以及深部地球物理信息揭示。由于断裂两侧密度差异引起的重力异常或因断裂带磁性矿物富集或岩浆侵入导致的磁力高/低条带可以在大尺度上表现出断裂的展布特征。

依靠三维地震资料可以精细刻画断裂的发育特征，但由于海域三维地震资料的有限性，本文主要聚焦惠州凹陷西南部，通过断层平-剖面组合特征、展布规律及其演化过程等方面的剖析，对惠州-北卫滩隐伏断裂进行综合识别，并建立断裂构造演化模式。

3. 惠州凹陷地质背景



① 为阳江-一统隐伏断裂，② 为惠州-北卫滩断裂。

Figure 1. Scheme of the Pearl River Delta basin (a), structural unit division and fault distribution map of the Huizhou sag (b), and a brief summary of the stratigraphic sequence of the Huizhou sag (c)

图 1. 珠江口盆地构造纲要图(a)、惠州凹陷构造单元划分及断裂分布图(b)及惠州凹陷地层层序简表(c)

南海北部陆缘位于太平洋和新特提斯两大构造域之间，其形成与演化受到多期多向构造叠加作用，珠江口盆地是南海北部陆缘的重要构造单元[6]，也是南海北部最大的含油气盆地。同时，珠江口盆地也处于欧亚板块、印度洋板块和太平洋板块三大板块的交汇处，从大地构造上看，盆地受特提斯构造域与太平洋构造域的联合制约，其复杂的构造应力环境贯穿整个盆地演化历史，特别是自中生代以来印支板块与华南板块的拼合碰撞、伊泽奈岐板块的俯冲消亡和太平洋板块的俯冲及后撤，形成了珠江口盆地前裂陷期特殊的基底构造[7][8]。盆地整体在中-新生代经历燕山-喜山期两大构造运动期，尤其是新生代受珠-琼运动、惠州运动、南海运动、新构造运动等影响，形成了多期次、多成因叠加的断裂体系。珠江口盆地存在 NE-NEE 向和 NW 向两组优势走向断裂，其中 NE-NEE 向断裂控制着盆地裂陷期的演化，使盆地整体形成形成“三隆两拗”的构造格局[9]，由北至南可以划分为五个构造单元，分别为：北部隆起带、北部拗陷带、中央隆起区、南部拗陷带以及南部隆起(图 1(a))。同时，珠江口盆地的基底具有复杂的构造演化历史，从古生代-中生代褶皱基底到中生代安第斯型陆缘[10]。重磁资料揭示，NE 和 NW 向

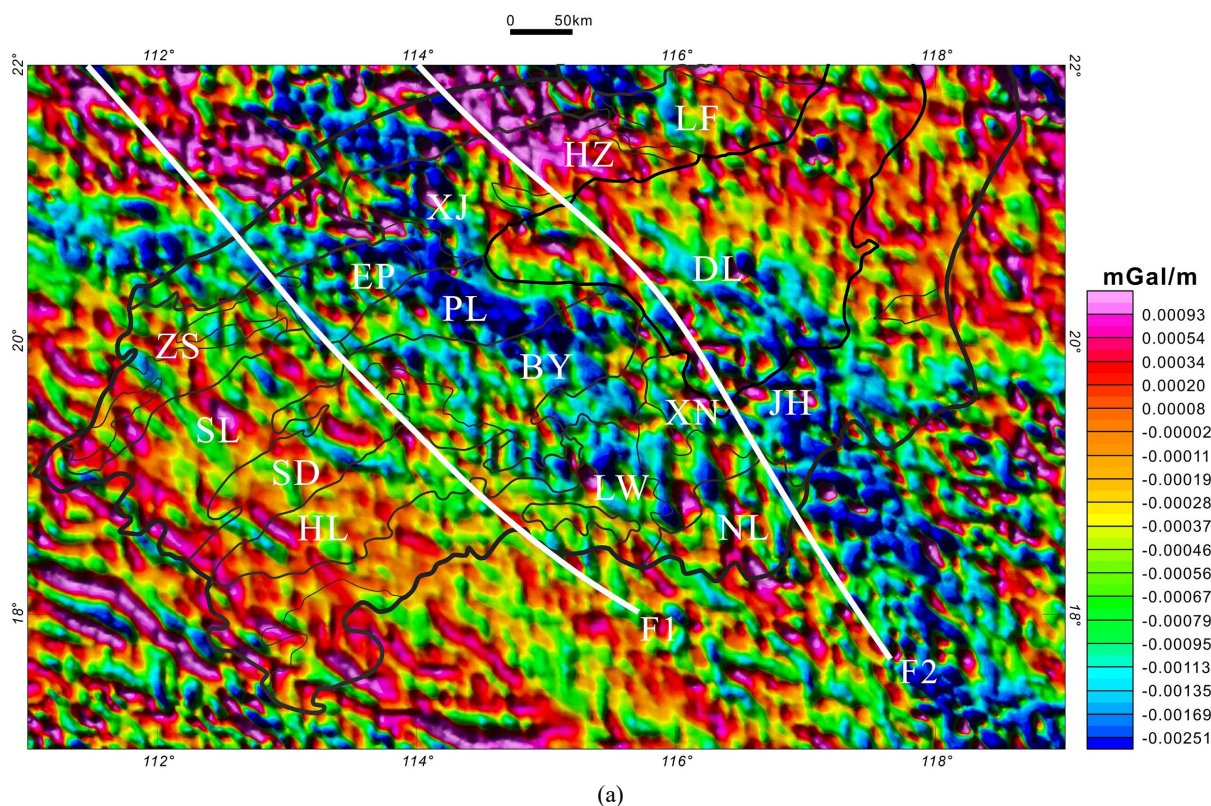
断裂不仅控制了盆地中生代基底构造[11],还深刻影响了古近纪断裂的发育模式。

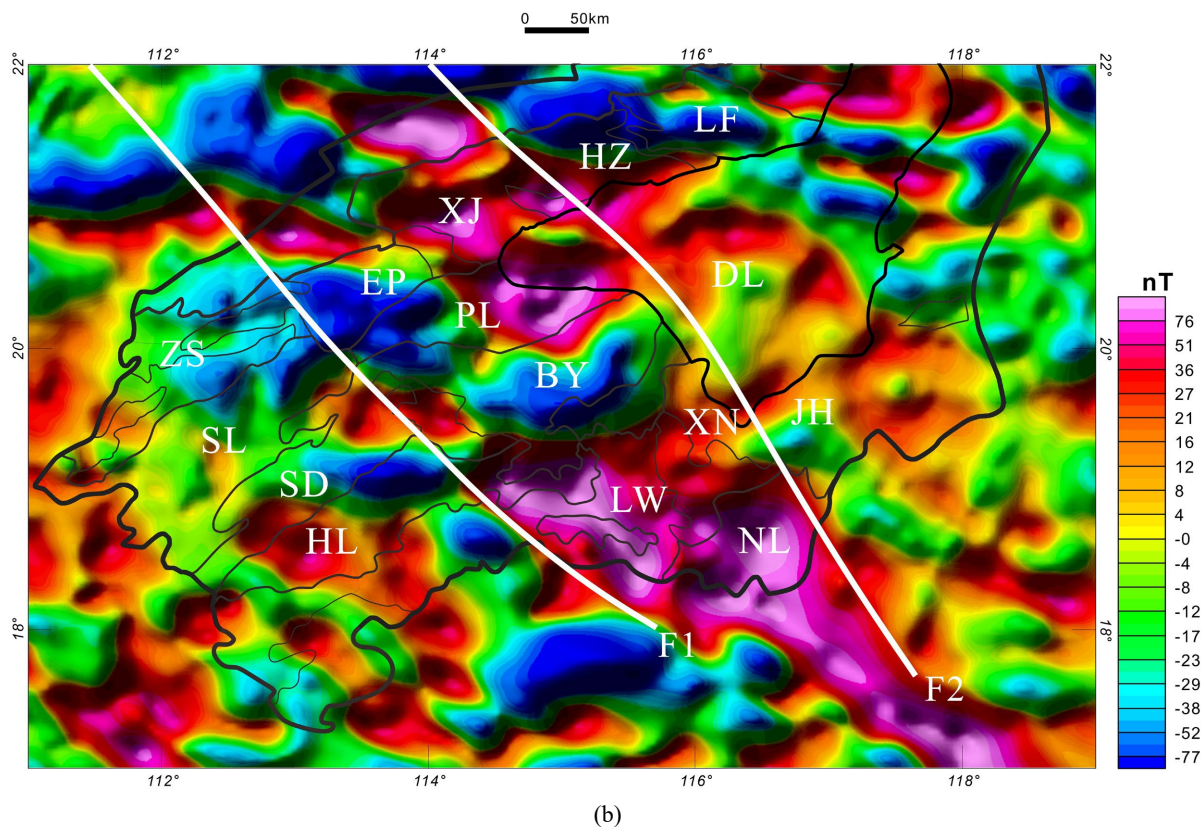
惠州凹陷位于南海北部珠江口盆地珠一坳陷中部,于新生代经历了多期构造运动,使得其具有“先断后坳”的双层结构和“下陆上海”的沉积体系[12](图 1(c)),其中上构造层为盆地拗陷期所形成的珠海组-琼海组的浅海-半深海相沉积,下构造层为盆地断陷期所充填的文昌及恩平组陆相沉积。新生代沉积底界面 T_g 界面是分布最广泛的不整合界面,也标志着珠琼运动的开始,即盆地进入断陷阶段。文昌组沉积期为裂陷I幕, T₈₃ 作为上下文昌组的界面,反映了由初始裂陷转变为强烈裂陷,恩平组沉积期为裂陷II幕,该时期裂陷作用逐渐减弱,拗陷作用开始显现。T₇₀ 界面为区域性不整合面,也可认为是上下构造层的分界面,其反映了南海运动的开始,各洼陷于此时期均接受稳定沉积,也标志着盆地由断陷阶段向拗陷阶段转换[13]。同时,惠州凹陷作为南海北部典型的富生烃洼陷,是珠江口盆地(东部)最早取得中深层古近系油气突破的地区,也在四十余年勘探历程中贡献了珠江口盆地近一半的油气探明储量及产量[3]。

4. 惠州-北卫滩断裂识别标志

本文所采用的基本研究资料包括布格重力资料、和磁异常资料,布格重力异常数据使用的是 Sandwell 等[14]的全球海洋重力模型,磁力异常数据所选取的模型是 Earth Magnetic Anomaly Grid 2 模型,两者数据精度均为 $2' \times 2'$,为深部构造的研究和反演提供了数据基础,同时能够进一步反映出地球在构造运动和壳幔相互作用过程中的地球物理场响应。

前人研究表明,重力与磁力异常特征可作为深大断裂识别的有效依据,以阳江-一统断裂为例的识别研究,进一步证实了重磁异常方法在断裂识别中的可靠性。通过对南海北部珠江口盆地的布格重力异常 45° 方向水平一阶导及磁力异常进行重新解译,并结合前人已识别 NW 向隐伏断裂进行了对照。





图中白线代表 NW 向先存隐伏断裂，F1 为阳江 - 一统断裂，F2 为惠州 - 北卫滩断裂，ZS 珠三拗陷，SL 神狐隆起，HL 顺鹤隆起，DL 东沙隆起，PL 番禺低隆起，NL 南部低隆起，EP 恩平拗陷，XJ 西江凹陷，HZ 惠州凹陷，LF 陆丰凹陷，SD 顺德凹陷，BY 白云凹陷，LW 荔湾凹陷，XN 兴宁凹陷，JH 靖海凹陷，下同。

Figure 2. (1) Bouguer gravity anomaly 45° horizontal first order directional derivative map of the Pearl River Estuary Basin in the northern South China Sea; (b) Magnetic anomaly map of the Northern South China Sea Pearl River Estuary Basin
图 2. (a) 南海北部珠江口盆地布格重力异常 45° 水平一阶方向导数图; (b) 南海北部珠江口盆地磁力异常图

由于布格重力异常通常涵盖地球内部主要密度界面起伏引起的质量亏盈以及局部剩余质量产生的影响，因此可以直观地反映研究区莫霍面的起伏与浅层地质构造信息[15]，但也导致其解译存在多解性，而对布格重力异常进行水平方向导数计算能反映区域内重力在特定方向上的变化特征，并突出揭示斜向构造或非正交走向的线性构造，易于识别斜向断裂或共轭剪切系，其中 45° 、 90° 及 135° 方向导数分别主要反映布格重力异常在 NE-SW 向、S-N 向和 NW-SE 向的重力变化特征，可分别体现对应(接近)方向的断裂对重力变化的影响程度，若地质异常体走向为 NW-SE 向，则 45° 方向水平一阶导数可以更敏感地捕捉其行迹。因此本文选用该方法对 NW 向先存隐伏断裂进行识别。

为了突出不同方向的重力异常特征，对珠江口盆地的布格重力异常进行一阶水平方向导数计算与分析。布格重力异常 45° 方向导(图 2(a))对珠江口盆地 NW 向断裂吻合良好，珠江口盆地惠州凹陷东侧可见明显的 NW 向异常线性条带延伸至东沙隆起中部，与西侧西江凹陷、白云凹陷一带形成鲜明对比，这一宏观特征反映了地壳密度在东沙隆起西界两侧横向分布不均，表明其两侧地层厚度、密度或莫霍面深度存在明显差异。

研究区磁力异常幅值为 -80 至 80 nT，明显可见珠江口盆地中部存在 NW 向磁异常高值条带，在白云凹陷南部尤为突出，反映该区域岩性发生显著变化(图 2(b))，自惠州凹陷到靖海凹陷南部沿 NW 向存在为磁力异常高值向低值突变的陡变带，在横向上局部磁力异常值由 76 nT 快速降低为 -77 nT，且前人识

别的阳江 - 一统断裂(F1)也具有及其相似的特征。综合重磁资料,基本可以确定惠州 - 北卫滩断裂(F2)穿过惠州凹陷西侧,过东沙隆起西缘,可沿 NW 向延伸至盆地以南。

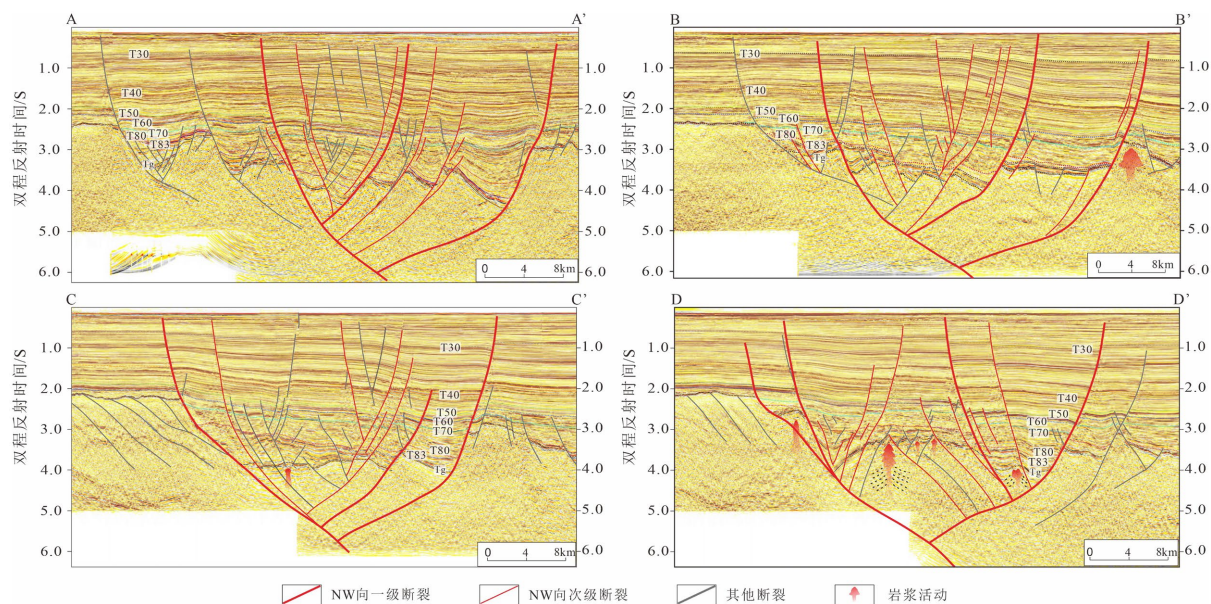


Figure 3. Comprehensive interpretation profile of the Huizhou-Beiwai Tan hidden fault earthquake in the study area, the location of the profile is shown in Figure 1(b)

图 3. 研究区惠州 - 北卫滩陷隐伏断裂地震综合解释剖面, 剖面位置见图 1(b)

基于重磁资料的解译,借助三维地震工区对断裂主干穿过的惠州凹陷西部进行构造解释,从剖面及平面上厘清惠州 - 北卫滩断裂的发育特征。先存隐伏断裂的继承性活化是惠州凹陷陷期乃至断拗转换期主导性的构造特征,并直接制约着盆地主要的构造样式。惠州凹陷在古近纪主要发育 NE-NEE 向、NW-NWW 向和近 EW 向三种走向的断裂,并在各自的活动时期影响着洼陷的演化以及沉积迁移。地震解释结果表明(图 3),惠州凹陷新近系沉积层内发育高角度平板状断层,其张性特征较为明显,古近系沉积层内断面多发生一定的变形,其中 NW 向一级断裂呈上陡下缓的铲式正断层,以对倾的形式于基底以下收敛至西侧断层,整体组合样式为似花状,并且断块发生明显的旋转,具有张扭断裂的地震剖面特征,同时受 NW 向一级断裂的影响,惠州凹陷西侧洼陷结构为双断式复式地堑。NW 向次级断裂多为高角度正断层,并与一级断裂搭接形成同向或反向正断层组合,表现为一系列凹面向下的正断层组成的由深部往浅层撒开的“Y”字型或似花状构造,且与一级断裂的似花状构造组合形成“花上花”的结构,这一特征的广泛发育指示研究区 NW 向断裂于古近系的活动具有一定的张扭特征。

综合以上证据认为惠州 - 北卫滩隐伏断裂在海域大致沿惠州凹陷西侧、东沙隆起西界、兴宁凹陷东界以及南部隆起东侧一带发育,在珠一坳陷发育位置在西江 23 洼东侧 - 惠州 24 洼 - 惠州 26 洼一带,对惠州凹陷西侧古近系洼陷演化起重要作用。

5. 惠州 - 北卫滩断裂发育模式

断层活动速率是指某一地层单元在一定时期内因断裂活动形成的落差与相应时间的比值,是分析断裂发育演化的关键方法之一[16][17],本文基于高精度三维地震资料,对惠州凹陷内一级、次级断裂共 20 条,以 50 个地震道为步长,测量并统计各关键界面的垂向断距,进而计算出对应地质时期的活动速率并求平均值。研究区内不同走向断层的各时期平均活动速率如图 4 所示。

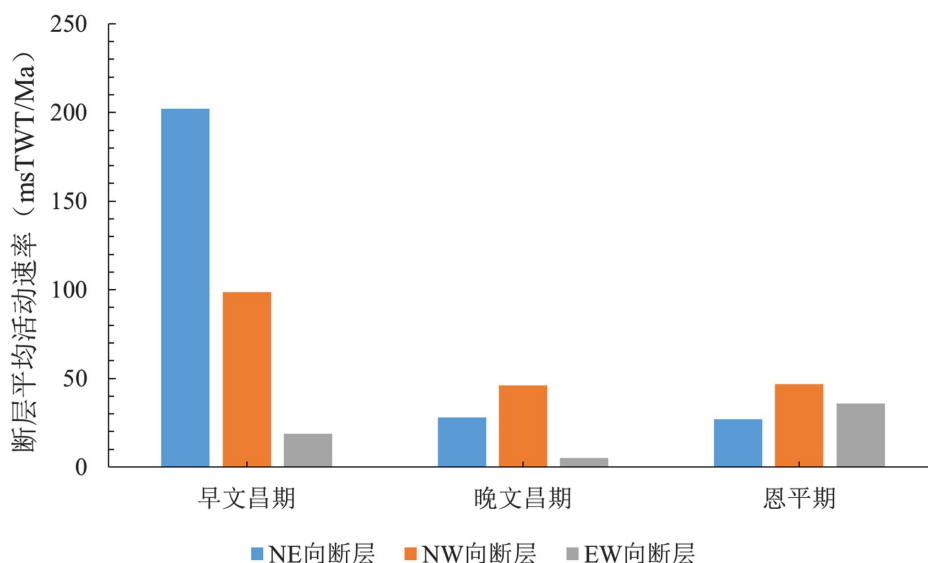


Figure 4. Average activity rate of various strike-slip faults in the study area during different periods

图 4. 研究区各走向断层不同时期平均活动速率图

惠州凹陷西南部主要发育三组不同走向断裂,分别为NE向、NW向、EW向,由于惠州凹陷西南部于古近纪经历了多期伸展作用,伸展方向从NW-SE向顺时针旋转近N-S向[18],三组不同走向断裂也表现出明显的差异活动。早文昌期(裂陷Ia幕),大量NE向断裂形成,同时由于是裂陷初期,其他走向断裂也随之发育;晚文昌期(裂陷Ib幕),NW向断裂活动占主导,此时进入裂陷衰退期,其他走向断裂活动较弱;恩平期(裂陷II幕),EW向断裂相对此前活动强度大幅增强,盆地进入断拗转换阶段,各走向断裂活动趋于平稳。

结合区域大地构造背景,以及研究区内断裂活动特征,绘制惠州-北卫滩断裂于研究区构造演化模式图,并将其演化划分为以下四个阶段:

1) 先存形成期(前新生代)(图 5(a))

前人认为珠江口盆地NW向先存隐伏断裂形成演受古特提斯域影响,最早形成于印支期,并在华南地区形成一系列的NW向走向逆冲断裂带,而后受太平洋域的影响,与NE向先存断裂相互切割改造,形成了前新生代NW向先存隐伏断裂体系[3][19]。

2) 张扭活化期(早文昌期)(图 5(b))

受喜山早期太平洋俯冲后撤以及古南海俯冲拖曳等活动的作用,南海北部应力场由压性转变为张性,盆地进入初始断陷阶段,在NW-SE向的小角度(近平行)斜向拉张下,使得NW先存隐伏断裂发生构造反转活化,具有左行张扭特征并与NE向断裂共同控洼。在惠西地区西南部活化特征较为明显,以惠州26洼最为典型,形成了以NW向为长轴的深断陷,显著控制了下文昌组的沉积。

3) 继承活动期(晚文昌期)(图 5(c))

由于在区域左行张扭应力场的作用下,拉张应力发生顺时针旋转,由NW-SE向转变为NNW-SSE向,斜向拉张角度增大,NW向断裂张扭减弱,以继承性发育为主,平面上成右阶雁列式排布,同时受惠州运动的影响,惠州凹陷南部发生大规模岩浆活动,使得基底发生隆升变形,并存在大面积剥蚀,沉积中心自南向北迁移,整体上表现为NE向断裂控制洼陷形态,NW向断裂限制沉积展布,以西江23洼和惠州24洼最为明显。

4) 张性拓展期(恩平期)(图 5(d))

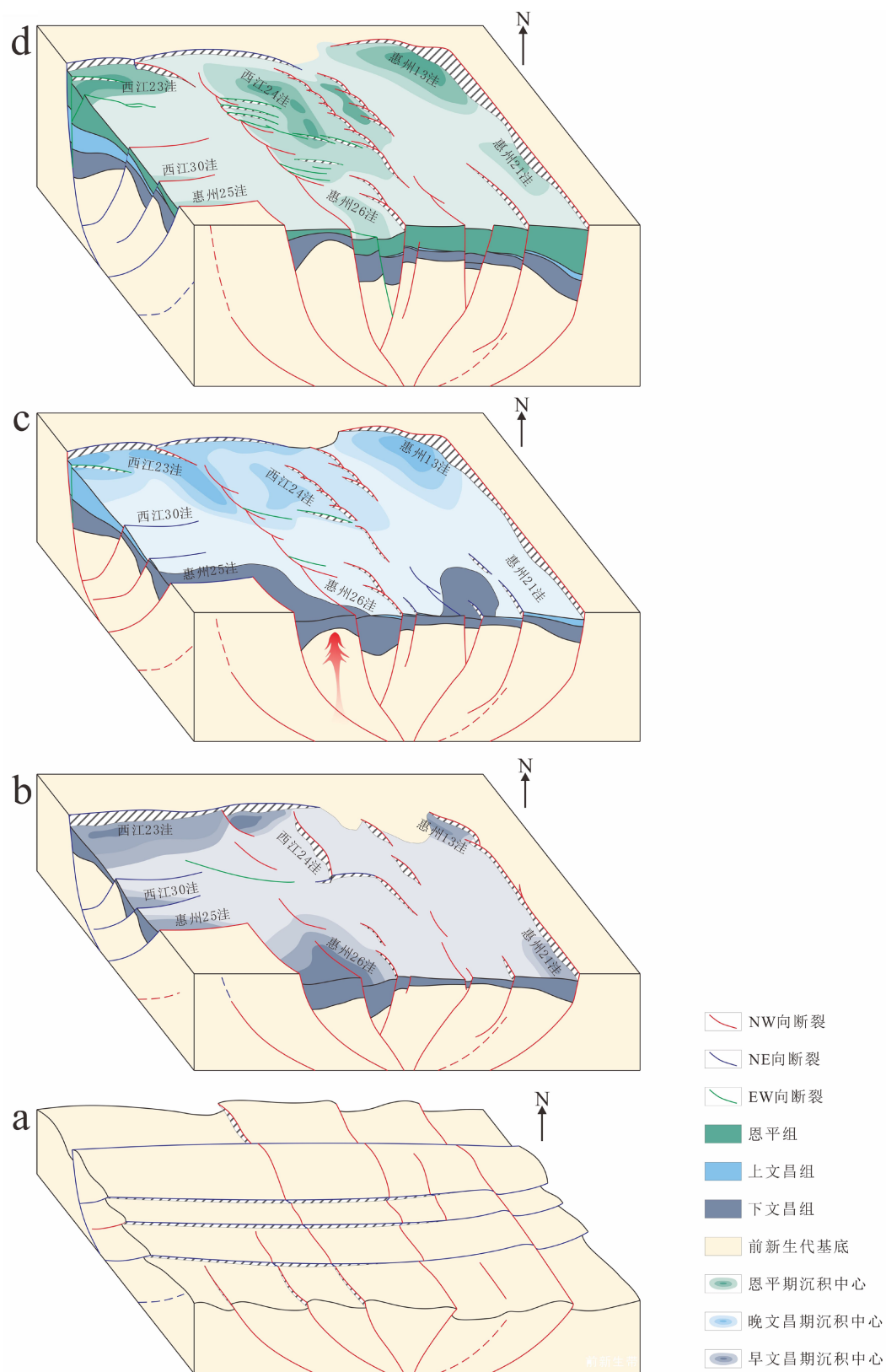


Figure 5. Evolutionary model of the Huizhou-Baiwei Tan hidden fault on the western side of the Huizhou sag
图 5. 惠州凹陷西侧惠州 - 北卫滩隐伏断裂演化模式图

进入渐新世后, 由于新南海洋脊的打开, 拉张应力转为 N-S 向, 几乎与惠州 - 北卫滩断裂近 45°斜交, 断裂张性特征显著, 平面上 NW 向断裂雁列式排布愈发明显, 使得 NW 向断裂可以独立控洼, 以 NW 向为轴的洼陷显著发育, 其中惠州 24 洼及惠州 13 洼控洼断裂活动增强, 沉积厚度增大, 沉积中心由带内迁至带缘。

6. 结论

1) 基于重磁异常与三维地震资料, 惠州 - 北卫滩隐伏断裂在海域大致沿惠州凹陷西侧、东沙隆起西界、兴宁凹陷东界以及南部隆起东侧一线发育, 在珠一坳陷发育位置在西江 23 洼东侧 - 惠州 24 洼 - 惠州 26 洼一带。

2) 惠州 - 北卫滩断裂于惠西地区剖面发育似花状构造, NW 向一级断裂为上陡下缓的铲式正断层, 并与 NW 向次级断裂组合形成“Y”字形构造, 整体断层组合样式具有张扭特征。

3) 结合区域地质背景以及各时期不同走向断裂活动特征, 将惠州北卫滩断裂的演化划分为四个阶段: 前新生代先存形成期; 早文昌张扭活化期; 晚文昌继承活动期; 恩平期张性拓展期。

基金项目

中国海洋石油有限公司前瞻基础研究项目“珠一坳陷隐伏断裂带特征及其控洼控藏作用研究”(KJQZ-2023-2001)。

参考文献

- [1] 王伟锋, 周维维, 单新建, 等. 沉积盆地隐性断裂带特征及其地质意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2236-2243.
- [2] 周维维, 王伟锋, 安邦, 等. 渤海湾盆地隐性断裂带识别及其地质意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(11): 1627-1638.
- [3] 刘培, 彭光荣, 李洪博, 等. 张扭型菱形地堑构造特征及其控藏作用: 以珠江口盆地惠州凹陷为例[J]. 地球科学, 2025, 50(8): 3213-3224.
- [4] 李守军. 南海北部多波束海底地貌多尺度分析及其构造意义指示[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- [5] 张馨予, 曹敬贺, 赵芳, 等. 珠江口海域 NW 向断裂的地震学特征及意义[J]. 华南地震, 2019, 39(4): 1-9.
- [6] 万志峰, 夏斌, 施秋华, 等. 南海北部陆缘构造属性研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(7): 1-9.
- [7] Copley, A., Avouac, J. and Royer, J. (2010) India-Asia Collision and the Cenozoic Slowdown of the Indian Plate: Implications for the Forces Driving Plate Motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**, B03410. <https://doi.org/10.1029/2009jb006634>
- [8] 杜晓东, 彭光荣, 吴静, 等. 珠江口盆地阳江东凹断层特征及其对油气成藏的影响[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(4): 414-421.
- [9] 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等. 珠江口盆地中新世代主要断裂特征和动力背景分析[J]. 热带海洋学报, 2005(2): 52-61.
- [10] Suo, Y., Li, S., Jin, C., Zhang, Y., Zhou, J., Li, X., et al. (2019) Eastward Tectonic Migration and Transition of the Jurassic-Cretaceous Andean-Type Continental Margin along Southeast China. *Earth-Science Reviews*, **196**, Article ID: 102884. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102884>
- [11] 王家林, 陈冰, 钟慧智, 等. 南海东北部前新生代基底构造格局和中生界的分布的研究[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第二十届年会论文集. 2004: 319.
- [12] 施和生, 李文湘, 邹晓萍, 等. 珠江口盆地(东部)砂岩油田沉积相研究及其应用[J]. 中国海上油气地质, 1999(3): 181-188.
- [13] 蔡嵩, 彭光荣, 陈兆明, 等. 珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 106-118.

-
- [14] Sandwell, D.T., Müller, R.D., Smith, W.H.F., Garcia, E. and Francis, R. (2014) New Global Marine Gravity Model from Cryosat-2 and Jason-1 Reveals Buried Tectonic Structure. *Science*, **346**, 65-67. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>
- [15] 陈灵茜, 徐新禹, 赵永奇, 等. 台湾海峡及其邻区重力异常小波多尺度分析[J]. 地震研究, 2025, 48(4): 561-571.
- [16] 郑军, 葛翔. 北部湾盆地海中凹陷断层活动性及其对沉积的控制[J]. 海洋石油, 2014, 34(4): 1-6.
- [17] 陈翔, 张成, 秦成岗, 等. 珠江口盆地惠州凹陷西南部地区古近纪构造特征及其演化模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 88-95.
- [18] Tang, X., Yu, Y., Zhang, X., Peng, G., Niu, S., Qiu, X., *et al.* (2023) Multiphase Faults Activation in the Southwest Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin: Insights from 3D Seismic Data. *Marine and Petroleum Geology*, **152**, Article ID: 106257. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106257>
- [19] 栾锡武. 东南亚构造分区[J]. 地球科学进展, 2022, 37(3): 221-252.