

基于航磁资料解释的珠江三角洲地区深部断裂*

毕丽思^{1,2}, 黄剑涛^{1,3}, 任镇寰¹, 叶秀薇¹, 卢帮华^{1,2}, 刘天佑⁴, 乔计花⁵

1. 广东省地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广东 广州 510070
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080
3. 中国地震局深圳防震减灾技术研究院, 广东 深圳 518003
4. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074
5. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100083

摘要: 珠江三角洲地区航磁异常场具有明显的分区性, 并且在以近EW向为主体的磁场背景下, 同时存在NE、NW向磁场体。经过对其航磁资料进行系统处理、分析、解释, 确认珠江三角洲地区地壳深部存在近EW向、NW向、NE向三组断裂系。近EW向断裂是主要断裂, 大部分深及30 km以上。NW向断裂较发育, 但切割深度较浅, 大部分在10 km左右。NE向断裂的切割深度亦不大, 特别是一些以往被称为是深部断裂者大多数只有10 km左右, 不超过20 km。三组断裂间相互切割, 但近EW向与NW向断裂活动性较强、活动时代较新。这些成果与重力资料系统处理结果基本一致, 与传统认识的珠江三角洲地区深部断裂格局则有较大改变。最后, 本文提出“新构造期深部断裂”的新概念和理论。

关键词: 珠江三角洲地区; 航磁异常; 深部断裂; 新构造期

中图分类号: P631.222; P627 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)04-0090-10

Deep faults in the Pearl River Delta region based on aeromagnetic data interpretation

BI Lisi^{1,2}, HUANG Jiantao^{1,3}, REN Zhenhuan¹, YE Xiuwei¹, LU Banghua^{1,2}, LIU Tianyou⁴, QIAO Jihua⁵

1. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, Guangdong Earthquake Administration, Guangzhou 510070, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China
3. Shenzhen Academy of Disaster Prevention and Reduction, China Earthquake Administration, Shenzhen 518003, China
4. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
5. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100083, China

Abstract: The aeromagnetic anomalies in the Pearl River Delta region show noticeable zones, which present a background of EW-direction zones and also exist aeromagnetic fields of NE and NW directions. By processing, analyzing and interpreting the aeromagnetic data, it is confirmed that three sets of faults, i. e., the EW-, NW- and NE-direction faults, constitute the framework of deep faulting system of the Pearl River Delta region. The EW-trending faults are major faults and most of them reach the depth over 30 km. The NW-trending ones are well-developed in the delta, but their depths are merely around 10 km. The NE-trending faults are also shallow; the depths of some NE faults, which are considered with a

* 收稿日期: 2020-03-02

录用日期: 2020-04-09

网络首发日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金-广东联合基金(U1901602); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)基金(99147-42080024)

作者简介: 毕丽思(1985年生), 女; 研究方向: 地震地质、活动构造与构造地貌; E-mail: bi_lisi@126.com

depth over 30 km previously, are about 10 km and definitely less than 20 km according to our interpretation. The three sets of faults are intersected each other; the EW and NW faults are more active than the NE ones, and their activity ages are newer as well. These results are agreement with those obtained from gravity data of the area, but different largely from the traditional cognizance of the deep fault structure of the Pearl River Delta region. A new concept of neotectonic stage of deep faults is proposed to explain these features.

Key words: the Pearl River Delta region; aeromagnetic anomalies; deep faults; neotectonic stage

航空磁力测量, 简称航磁, 是一种地球物理勘探的重要方法, 具有很高的应用价值。由于航磁异常值代表了实测磁场总强度与背景场强度之差, 它突出了区域异常的分布特征, 客观上反映了某些重要的区域构造轮廓, 也可以直观地反映断层的空间展布及地壳结构^[1-2], 因此它是学者们分析深部地质构造的重要技术手段。

珠江三角洲是南海北缘的重要组成区域, 也是华南沿海地震带中的强震区。由于受南海扩张以及菲律宾板块推挤的影响, 珠江三角洲内部断裂纵横交错, 主要发育EW、NE和NW向3组断裂。这些断裂不仅控制了珠江三角洲河道的延伸方向、古海岸线和第四系沉积物的展布, 也影响着地震活动的发生。受三组断裂的切割, 珠江三角洲形成了多个垂向上具有不同运动方向和运动速率的断块, 三角洲的新构造运动以断裂活动和断块差异升降运动为主要特征, 地震活动也较强烈^[3-11]。专家们对珠江三角洲断裂构造的研究成果丰硕, 这些成果大多数是通过地表地质地貌调查, 或者浅地表钻探、地形变等手段来作出分析研究的, 利用重磁等地球物理勘探手段来分析珠江三角洲地区的深部构造特征的研究成果并不多见^[12-18]。而对深部断裂(多指地表出露规模很大, 长度达数百公里以上, 深度常切穿基底甚至地壳的断裂)的研究对认识一个地区的地壳稳定性及规范城市的发展十分重要, 它有助于加深对地壳深部结构、破坏性地震孕育、动力学环境特征等的认识。在这少数的重磁研究成果中, 航磁资料的应用更少, 而且所用的位场处理方法也有限, 严重限制了其深部构造的系统性探索。近年来, 由于计算机获取数据以及对数据的处理、分析与挖掘能力不断提升, 使以往利用程度受限的航磁数据能被充分地、更深层次地开发挖掘。

基于上述因素, 本文利用国内自主研发的航磁数据处理软件, 对珠江三角洲航磁数据进行了化极、频率域延拓、水平向与垂向导数换算、小

波变换、分形分析等多种方法处理, 并从浅部到深部、从平面到剖面、从区域到局部、从不同方向, 综合系统地珠江三角洲地区的深部断裂构造进行解译、分析。

1 资料处理

本文所采用的航磁资料主要是原广东省地矿局物探大队根据全国统一规范实测和编制的广东省1:50万航磁异常图(1988年)及相关数据资料, 通过地理信息软件对资料进行数字化处理, 形成了东西宽300 km, 南北长260 km(112°~115°E, 21°40'~24°00'N), 涵盖珠江三角洲的研究区(图1)。区内设有测线131条, 每条测线151个测点, 共19 781个数据点, 点距约为2 km, 并对图形进行矢量化和数据检查分析, 成图系统误差未超过0.001 5。

对上述航磁资料, 本文采用了国家863项目“海洋深部地壳探测技术”专题“重磁地震综合反演方法技术及软件系统”进行系统处理, 其中包括航磁化极、频率域延拓、水平向与垂向导数换算、小波变换、分形分析、总梯度模等, 然后对所取得的88幅有效成果图逐图进行断裂详细分析、综合解释, 最终编制了珠江三角洲地区深部断裂系统图(图2)。

2 磁场基本特征

从图1可见, 珠江三角洲地区航磁异常场具有明显的分区性, 以开平-江门-中山-深圳一线为界, 珠江三角洲地区的磁场可分为两个区, 界线以北是平缓正负磁场区(北部区), 界线以南是正负磁场变化区(南部区), 分界线表现为整齐的EW向梯度带。

北部区的总体特征是在正磁场的背景下, 花斑状分布着负磁场, 磁场强度总体不大, 大部分区域约为-10~+20 nT; 最大正磁场值为30 nT, 位于从化, 岩性以花岗岩为主; 最低负磁场值为-28

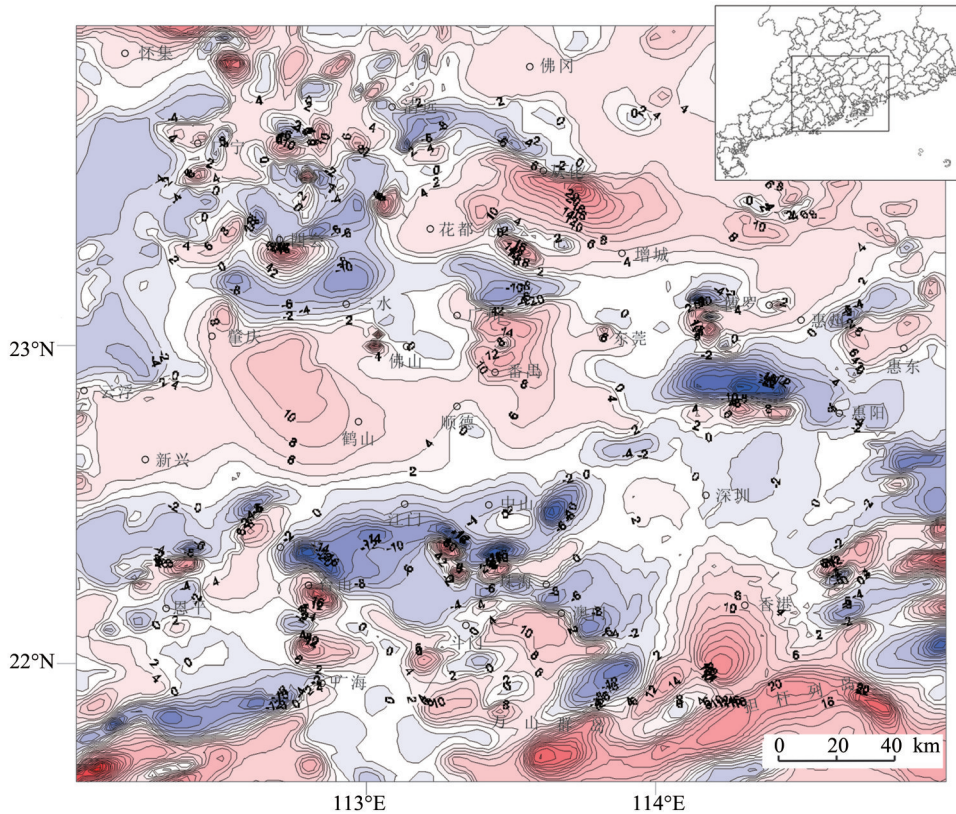


图1 珠江三角洲地区航磁异常图

Fig. 1 Aeromagnetic anomalies of the Pearl River Delta region

nT, 在博罗南约 30 km 一带, 岩性以侏罗纪火山岩为主。北部区的磁场梯度变化平缓, 磁场较宽, 在方向上明显以近 EW 向为主, 越往南越显著。在中部肇庆、四会、花都、从化、博罗、佛山、东莞、惠东等地表现为 NEE、NWW 向磁场体串珠状地排列为近 EW 向磁场带。北部区可划分出以下若干个近 EW 向异常带: 怀集-佛冈带、广宁-清远-龙门-河源带、从化延伸带、四会-花都-增城带、肇庆-三水-广州-博罗-惠州带、云浮-佛山-番禺-惠东带、新兴-鹤山-顺德-惠阳带、新兴南-开平北-中山北-深圳带。另外, 在总体近 EW 向磁场体的背景下, 局部也发育有 NE、NW 向磁场体。

南部区亦以航磁等值线近 EW 向展布为总体特征, 同样, 局部也存在 NE 向、NW 向磁场体。与北部区不同的是, 南部区是正负磁场变化区, 区内北部以负磁场为主, 南部以正磁场为主, 正、负磁场区的分界线大致位于广海-斗门-澳门-香港一线。负磁场区的北界线呈整齐的 EW 向梯度带, 与其北侧的北部区正磁场相邻, 是正负不同性质磁场的分界线, 这一 EW 向梯度带由西往东延伸, 至深圳附近不甚明显, 深圳以东则再度出现。而负磁场的南界线虽然仍呈 EW 走向, 但不甚整齐,

其中还分布有正异常磁场。正磁场区则在万山群岛-担杆列岛一线梯度较大, 强度亦较大, 异常值约为 12~30 nT; 这一梯度带的东西侧夹有小范围负磁场, 强度较小。这一线以南的海域则分布着一条巨大的负磁异常带(图外)。

可见, 珠江三角洲地区在以近 EW 向磁场为主体, 同时存在 NE、NW 向磁场体, 这反映了控制本区磁场体发育的近 EW、NE、NW 向 3 组构造。

3 深部断裂解释

本文对航磁资料系统处理得到了 88 幅有效成果图, 经过逐图详细的断裂分析、综合解释、拟合, 编制了珠江三角洲地区深部断裂图(图 2)。

3.1 近 EW 向断裂系

珠江三角洲地区内经航磁资料解释的近 EW 向主干断裂有佛冈-丰良断裂带(F1)、四会-增城断裂带(F2)、高要-惠来断裂带(F3)、鹤山-惠东断裂带(F4)、五桂山北麓断裂带(F5)、滨海断裂带(F6)。这些断裂带在航磁图像上都有明显的反映。

如上文所述, 在珠江三角洲地区航磁异常图中(图 1), 近 EW 向梯度带十分明显, 尤其在开平-江门-中山-深圳一线、广海-斗门-澳门-香港

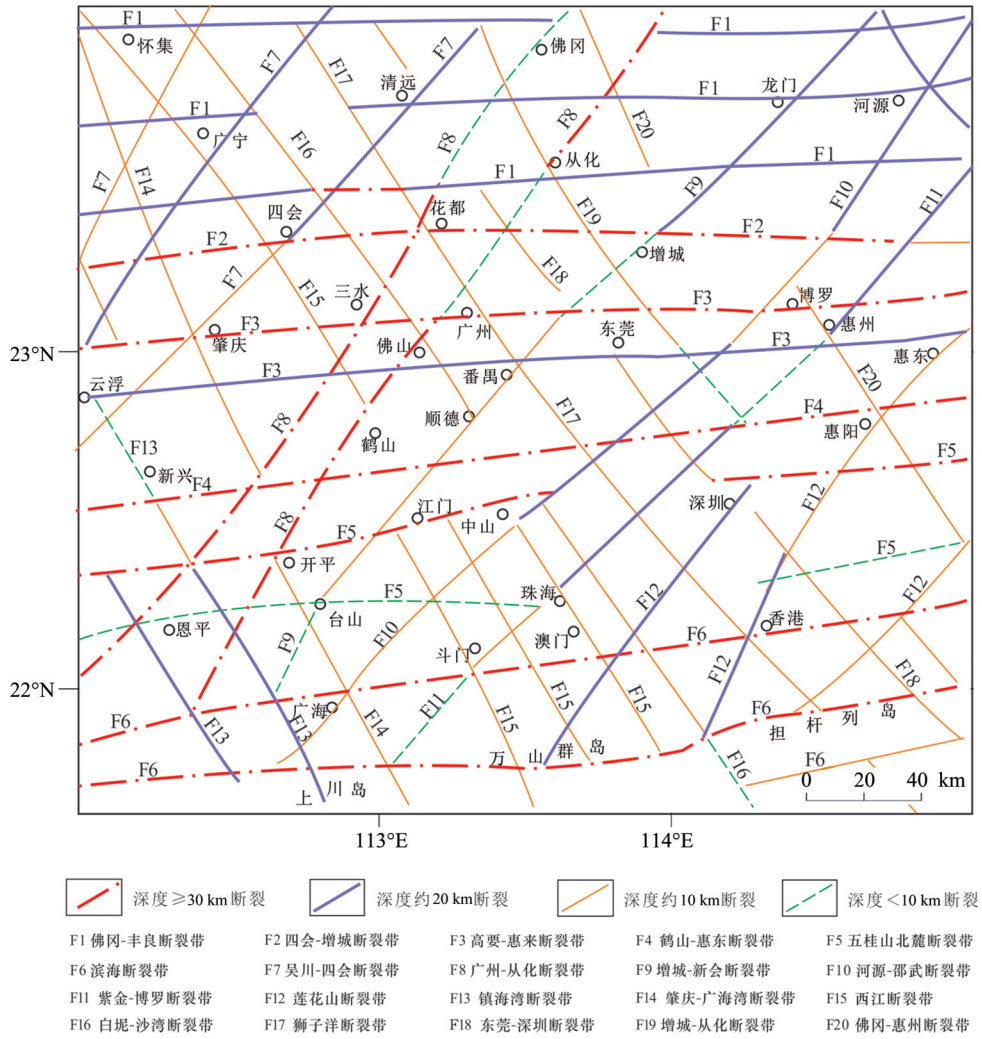


图2 基于航磁资料解释的珠江三角洲地区深部断裂图

Fig. 2 Map of the deep faults in the Pearl River Delta region interpreted based on the aeromagnetic data

一线、万山群岛-担杆列岛一线等正负磁异常分界地带近EW向梯度带相当突出,这分别是五桂山北麓断裂带(F5)、滨海断裂(F6)的物理场反映。这在上延5 km图中更加清晰(图3a),直至上延30 km仍然显而易见。在航磁化极等值线图中(图3b),近EW向等值线带横贯全图,近EW向断裂的格局被清晰地反映出来。在着重反映EW向构造的航磁0°一阶方向导数等值线图中(图3c),整齐的近EW向等值线带得到很好的反映。在45°和135°一阶方向导数系列图中(图3d,3e),近EW向断裂也有较好的反映,主要表现为等值线带呈近EW向串珠状排列。即使在反映EW向构造最弱的90°一阶方向导数系列图中(着重反映SN向构造,图3f),近EW向断裂的信息仍然不能被全部屏蔽,常以短距离等值线被反映出来。在垂向二阶导数图(图3g)、小波分析细节图(图3h)、水平总梯度模图(图3i)、分形维数图(图3j)等图像中,

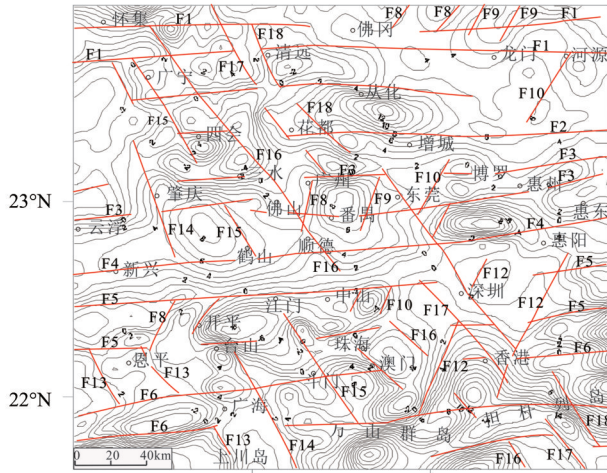
近EW向断裂系都能被较好地反映出来。从各航磁图像中可见,近EW向断裂系的规模很大,磁场结构完整,连接性好,很少被其他方向的构造间断,而且切割深度深,除佛冈-河源断裂带(F1)切割深度不超过20 km外,其余近EW向主干断裂的切割深度均达30 km以上。

3.2 NE向断裂系

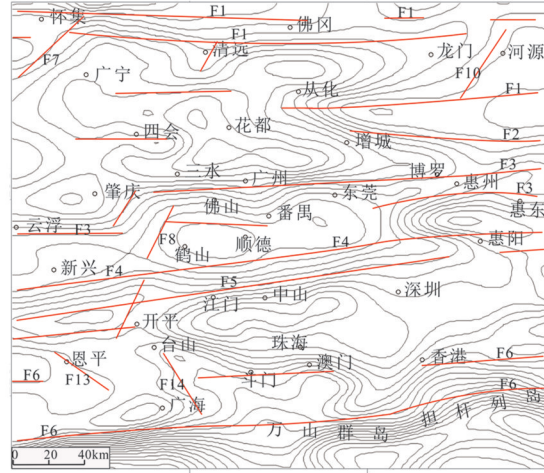
研究区内解释出来的NE向主干断裂有吴川-四会断裂带(F7)、广州-从化断裂带(F8)、增城-新会断裂带(F9)、河源-邵武断裂带(F10)、紫金-博罗断裂带(F11)、莲花山断裂带(F12)。

NE向断裂系是区内地表规模最大,出露最明显,地貌特征最突出的一组断裂,而且大部分是传统认为的深部断裂,但其在航磁图像上的反映远不如近EW向断裂系那么强大、明显。它们在航磁异常图上多表现为断断续续的NE向磁场体,航磁等值线多呈短距离NE向同步拐弯,规模不大、

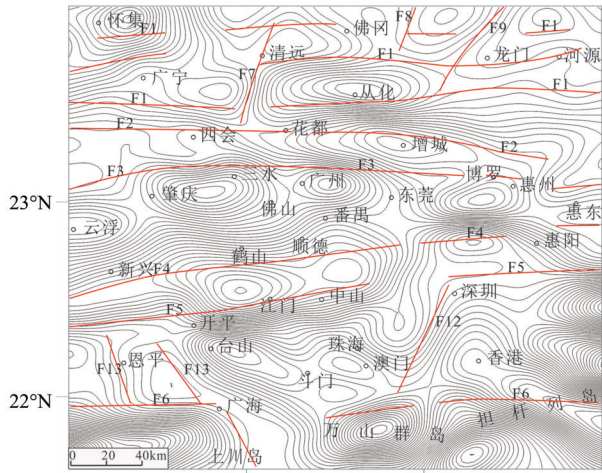
(a) 上延5km等值线图



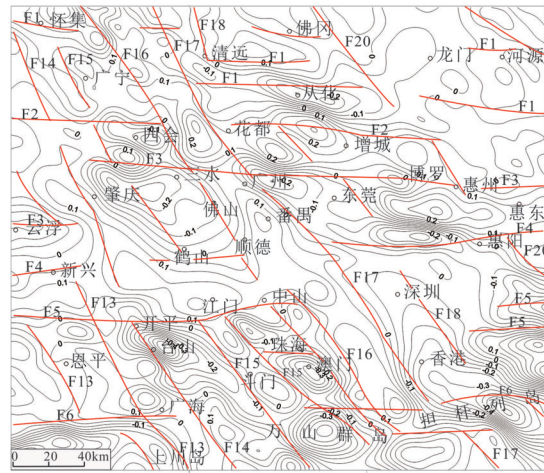
(b) 化极上延10km等值线图



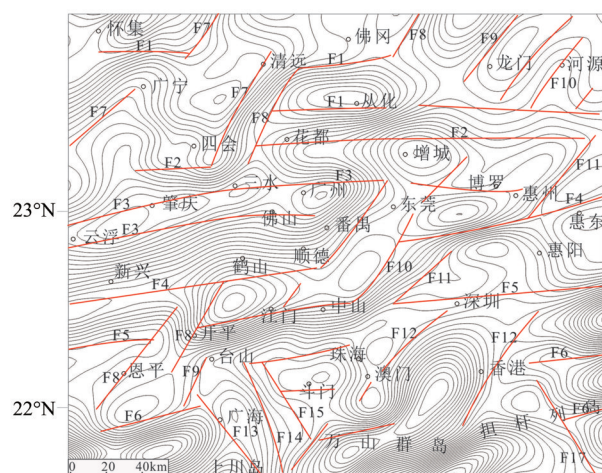
(c) 上延20km一阶方向导数等值线图(0°)



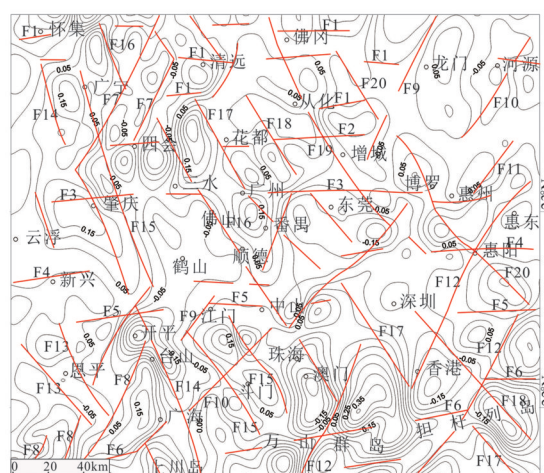
(d) 上延10km一阶方向导数等值线图(45°)



(e) 上延20km一阶方向导数等值线图(135°)



(f) 上延10km一阶方向导数等值线图(90°)



113°E

114°E

113°E

114°E

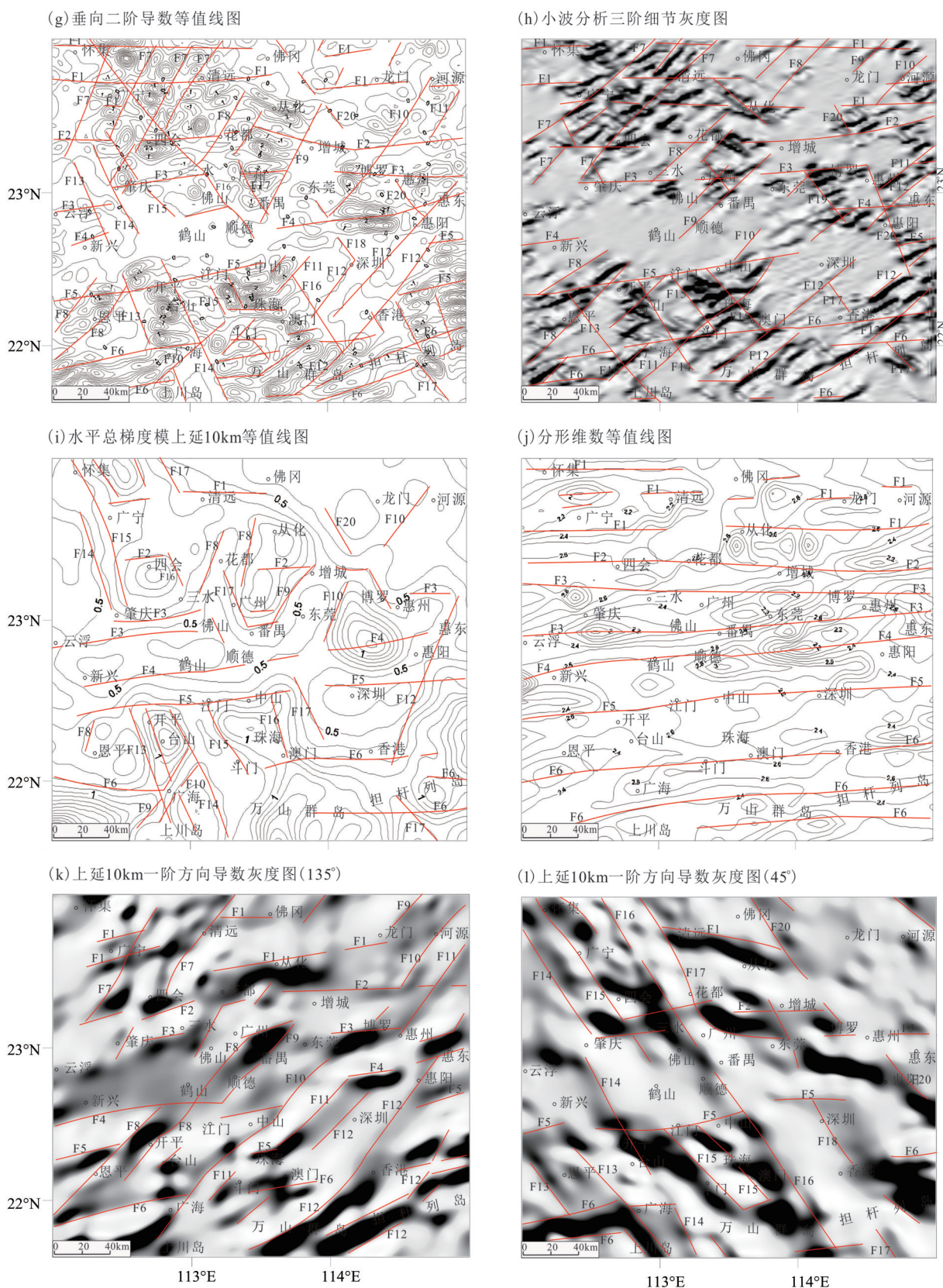


图3 珠江三角洲地区航磁异常资料系统处理成果图像

Fig. 3 Aeromagnetic anomaly images of the Pearl River Delta region with kinds of methods

带性不明显(图1,图3a)。即使在着重反映NE向构造的 135° —一阶方向导数系列图中(图3e),亦只是表现为短距离的、不整齐的NE向等值线带或同步拐弯带;在灰度图中(图3k),NE向黑影条带色泽较浅,带性较弱。它们大多数切割深度较浅,约10~20 km,在上延30 km系列图中,只见广州—从化断裂带(F8)的局部段落有所反映。在 0° 和 90° —一阶方向导数系列图中(图3c,3f),只有少数断裂带的局部段落有所反映(如吴川—四会断裂带、广州—从化断裂带、增城—新会断裂带的NE段),但影像模糊,边界不整齐。其他方法成果图像,如垂向二阶导数图(图3g)、小波分析细节图(图3h)、水平总梯度模图(图3i)等,对NE向断裂都有一定程度的反映,但都表现为带性不明显、断断续续的分布特征,切割深度浅。

3.3 NW向断裂系

研究区内解释出来的NW向主干断裂有镇海湾断裂带(F13)、肇庆—广海湾断裂带(F14)、西江断裂带(F15)、白坭—沙湾断裂带(F16)、狮子洋断裂带(F17)、东莞—深圳断裂带(F18)、增城—从化断裂带(F19)、佛冈—惠州断裂带(F20)。

NW向断裂系在各种航磁成果图像上都有较好的反映。它们在航磁异常图上表现为NW向磁场梯度带或者NW向同步拐弯带(图1,图3a)。在 45° —一阶方向导数等值线图中(着重反映NW向构造,图3d),NW向等值线带性尤为明显,连接性好;在灰度图中则表现为NW向斜列浓黑条带(图3l)。在其他方法成果图像中,NW向断裂系也都有一定程度的反映(图3g,3h,3i)。这些NW向断裂系在上延10 km的图像中反映最为清楚,但上延20 km以深,图像就变得很模糊了。由此可见,NW向断裂总体上发育较浅(不深于10 km)。

4 断裂切割关系解释

断裂间的切割关系可以反映断裂的新老次序。本次航磁资料处理的许多图像都能在一定程度上反映3组断裂系的切割关系。

从图1和图3a明显可见,近EW向断裂系横贯研究区,连续性好,等值线带性强,众多的NE向和NW向断裂都被它阻断。在 0° —一阶方向导数系列图中(图3c),明显可见EW向佛冈—丰良断裂带(F1)、四会—增城断裂带(F2)间断了NE向吴川—四会断裂带(F7)、广州—从化断裂带(F8)、增城—新会断裂带(F9),EW向五桂山北麓断裂带(F5)、滨

海断裂带(F6)间断了NE向莲花山断裂带(F12)与镇海湾断裂带(F13),却很少见到NE、NW向断裂切断近EW向断裂的反映。在着重反映NW向构造的 45° —一阶方向导数系列图中(图3d),仍然可见EW向高要—惠来断裂带(F3)间断了NW向白坭—沙湾断裂带(F16)、狮子洋断裂带(F17)、东莞—深圳断裂带(F18)、佛冈—惠州断裂带(F20),EW向五桂山北麓断裂带(F5)间断了NW向镇海湾断裂带(F13)、肇庆—广海湾断裂带(F14)、西江断裂带(F15)等。又如在 45° —一阶方向导数灰度图中(图3l),NW向的黑影条带表现为短距离的近EW向断头带或被拖拽转向EW向,这都是NW向断裂被近EW向断裂切割的确切反映。同样,在着重反映NE向构造的 135° —一阶方向导数系列图中(图3e,3k),随处可见近EW向断裂切割NE向断裂。由此可见,近EW向断裂信息非常强大,远远高于其他两个方向的断裂。其他方法的航磁图像也显示,NE、NW向断裂与EW向断裂相交时,大多数被其间断(图3g,3h,3i)。以上充分说明了近EW向断裂切割NE、NW方向断裂的频次最高、力度最强。

这里值得一提的是,近EW向滨海断裂带(F6)阻截了所有NE向断裂使其止于南海大陆架,但与不少NW向断裂相互切割。这一方面说明了滨海断裂带(F6)规模巨大、活动性强,另一方面也说明了NW向断裂与近EW向断裂有可能是同期活动的,只是在珠江三角洲地区深度浅,活动性或弱一些。

另外,NW向、NE向断裂切割近EW断裂的现象也是存在的。如图3c中吴川—四会断裂带(F7),在清远一带切割了EW向佛冈—丰良断裂带(F1);相似地,NE向增城—新会断裂带(F9),在龙门西与EW向佛冈—丰良断裂带(F1)互有切割。又如图3d中肇庆—广海湾断裂带(F14)、白坭—沙湾断裂带(F16)、狮子洋断裂带(F17)明显地切断或延伸过了滨海断裂带(F6),这至少反映了互相交切的状况。

至于NW向与NE向断裂间的切割关系,由于两个方向的断裂大体成直角相交,在一阶方向导数计算处理上相互屏蔽,两者很难在同一个图上同时得到反映,但是在其他方法图像中还是有一定程度的反映,如垂向二阶导数图(图3g)、水平总梯度模图(图3i)等。总体上看,NW向断裂切割NE向断裂的频次和力度都高一些,这在一定程度上反映了NW向断裂较NE向断裂活跃且活动年

龄较新。

因此, 综合各种方法航磁图像所反映的3组断裂间的切割关系来看, 近EW向断裂最为强大, 是主要活动断裂, 它与NW向断裂都是发育比较新的构造, 但NW向断裂的活动性明显较EW向断裂弱; 至于NE向断裂则相对较老, 活动性次于前两组断裂。这一观点与文献[19-21]一致。

5 讨论

任镇寰等^[12]曾利用重力资料对珠江三角洲地区的深部断裂进行解释, 与其相比较, 本文所解释的主干断裂及其走向、空间展布、切割关系都是基本一致的, 无论是著名的、研究程度高的断裂, 如广州-从化断裂带(F8)、莲花山断裂带(F12), 还是以往地质资料鲜见报导的断裂, 如四会-增城断裂带(F2)、五桂山北麓断裂带(F5)。这说明了由航磁资料和重力资料解释的断裂是客观存在的。但是, 与由重力资料得到的解释结果相比^[12], 本文解释的断裂深度略有不一致之处。如本文经航磁资料解释的EW向高要-惠来断裂带(F3)北分支深度 ≥ 30 km, 南分支深度约为20 km, 而经重力资料解释该断裂带南北两分支的深度均约10 km。又如NW向肇庆-广海湾断裂带(F14)、西江断裂带(F15)、白坭-沙湾断裂带(F16)、增城-从化断裂带(F19)与佛冈-惠州断裂带(F20)在四会-增城断裂带(F2)以北的段落经航磁资料解释深度约为10 km, 而经重力资料解释的深度约为20 km。考虑到重力测量的干扰因素较少, 非断裂活动造成的异常更易被识别出来, 而且结合近些年珠江口区域开展的三维地壳结构观测最新研究成果^[22-23], 本文认为高要-惠来断裂带(F3)南北两分支的切割深度均可取10 km左右, 肇庆-广海湾断裂带(F14)、西江断裂带(F15)、白坭-沙湾断裂带(F16)、增城-从化断裂带(F19)与佛冈-惠州断裂带(F20)在四会-增城断裂带(F2)以北的段落其切割深度约为20 km, 其他断裂的深度维持图2的解释结果。

由航磁资料图像所反映的深部断裂可看出, 珠江三角洲地区存在近EW向、NE向、NW向3组深部断裂系统, 其中近EW向断裂是深部主控断裂, 在航磁图像显示的规模最大, 基本上都是自西向东横贯全区, 切割深度很大, 在解释出的6条主干断裂中, 除了佛冈-丰良断裂带(F1)、高要-惠来断裂带(F3)的深度不超过20 km外, 其余断裂

均为30 km以上, 这是NE、NW向断裂无法比拟的, 其活动性也比较强。这与一些学者认为的NEE向(近EW向)构造是南海北缘(华南地区)的主要活动构造的观点是一致的^[24-26]。而NE向断裂虽然地表规模很大, 但它们在航磁图像上反映除了广州-从化断裂带(F8)深达30 km外, 其余NE向断裂的深度均不超过20 km, 而且不少断裂的一些段落仅有10 km深度(图2), 活动性较弱。这有别于传统认为的NE向断裂是华南地区的主要深部断裂, 活动性最强的观点。NW向断裂在航磁图像上反映的深度也较浅, 除镇海湾断裂带(F13)以及肇庆-广海湾断裂带(F14)、西江断裂带(F15)、白坭-沙湾断裂带(F16)、增城-从化断裂带(F19)与佛冈-惠州断裂带(F20)在四会-增城断裂带(F2)以北的段落能深达20 km外, 其余断裂(或段落)仅深约10 km, 甚至有些段落不足10 km。这与大多数学者认为的NW向断裂规模小, 深度浅是相吻合的。

上述断裂的规模、切割深度、活动性与传统的认识有一些差异。以往普遍认为, 近EW向佛冈-丰良断裂带(F1)、高要-惠来断裂带(F3), NE向吴川-四会断裂带(F7)、河源-邵武断裂带(F10)、紫金-博罗断裂带(F11)、莲花山断裂带(F12), NW向西江断裂带(F15)、狮子洋断裂带(F17)是深部断裂^[27], 但本次航磁资料解释结果显示, 它们当中最深者约20 km, 大多数只有10 km左右, 并非是深及30 km以上的大断裂。以往文献鲜有论述的EW向的四会-增城断裂带(F2)、五桂山北麓断裂带(F5)则是深达30 km以上的断裂, 其中五桂山北麓断裂带(F5)正是珠江三角洲地区南北磁场区的分界线, 也是正负磁异常的分界线。

这种构造格局的改变我们认为应从地质构造史的角度来分析。以往文献中的“深部断裂”多指地表出露规模很大, 长度达数百公里以上, 深度常切穿基底甚至地壳的断裂, 它们通常是大型断陷盆地、山脉、火山、岩体等地质地貌标志而确定的。这些标志是历次构造运动、多期地质时代的产物。而本文所采用的航磁资料反映的是最新一次构造运动(新构造运动)后地壳物质的成分及结构状态。在新构造运动时期, 地壳物质运动会对前期构造物质进行改造, 地壳物质结构改变了, 特别是深部物质成分及其结构被改造了, 不再维持地质史时期原有深大断裂的物质结构, 只保留部分浅部物质结构, 所以它们的切割

深度变浅了,不再是深部断裂了。同样,在新构造运动中,新的深部物质运动可以形成新的深断裂,也可以继承原来深部断裂或改浅为深的断裂。这自然会在重磁场鲜明反映处理。这就是本文航磁资料解释深部断裂构造格局与传统认识有较大差别的物理基础。因此,本文的深部断裂是指新构造期深部断裂。这一概念的提出,对研究新构造、地震地质、地质灾害等或有理论意义和实用价值。

6 结 论

本文分析了珠江三角洲地区的航磁异常场特征,并用多种方法对航磁数据进行系统处理、综合分析,解译了该地区的深部断裂,得出以下结论:

1) 珠江三角洲地区航磁异常场具有明显的分区性,并且在以近EW向为主体的磁场背景下,同时存在NE、NW向磁场。

2) 珠江三角洲地区地壳深部存在近EW向、NW向、NE向3组断裂。近EW向断裂是主要断裂,大部分深及30 km以上。NW向断裂较发育,但切割深度较浅,大部分在10 km左右。NE向断裂的切割深度也不大,特别是一些以往被称为是深部断裂者大多数只有10 km左右,不超过20 km。

3) 近EW向、NW向、NE向3组断裂间相互切割,但近EW向与NW向断裂活动性较强、活动时代较新。

4) 本文基于航磁资料解释的珠江三角洲地区深部断裂格局与传统的认识有较大改变,提出了“新构造期深部断裂”的新概念和理论。

参考文献:

- [1] 郭惠莹,杨长保. 东北地区火成岩的航磁异常特征分析[J]. 世界地质,2018,37(1): 243-249.
GUO H Y, YANG C B. Characteristics of aeromagnetic anomalies in igneous rocks in Northeast China [J]. *Global Geology*, 2018, 37(1): 243-249.
- [2] TOZER B, WATTS A B, DALY M C. Crustal structure, gravity anomalies, and subsidence history of the Parnaiba cratonic basin, Northeast Brazil [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(7): 5591-5621.
- [3] 黄镇国,李平日,张仲英,等. 珠江三角洲的形成发育演变[M]. 广州:科学普及出版社广州分社,1982.
HUANG Z G, LI P R, ZHANG Z Y, et al. The formation, development and evolution of the Pearl River Delta [M]. Guangzhou: Guangzhou Branch of Popular Science Press, 1982.
- [4] 陈国能,张珂,贺细坤,等. 珠江三角洲晚更新世以来的沉积-古地理[J]. 第四纪研究,1994(1): 67-74.
CHEN G N, ZHANG K, HE X K, et al. Paleo-geographic evolution of the Pearl River Delta since the late Pleistocene [J]. *Quaternary Sciences*, 1994(1): 67-74.
- [5] 黄玉昆,夏法,陈国能. 断裂构造对珠江三角洲形成和发展的控制作用[J]. 海洋学报,1983(3): 316-327.
HUANG Y K, XIA F, CHEN G N. The fault structures' controlling effects on the formation and development of the Pearl River Delta [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1983(3): 316-327.
- [6] 陈国能,张珂,陈华富,等. 珠江三角洲断裂构造最新活动性研究[J]. 华南地震,1995,15(3): 16-21.
CHEN G N, ZHANG K, CHEN H F, et al. A study on the neotectonics of the faults in the Pearl River Delta area [J]. *South China Journal of Seismology*, 1995, 15(3): 16-21.
- [7] CHEN G N, ZHANG K, LI L F, et al. Development of the Pearl River Delta in SE China and its relations to re-activation of basement faults [J]. *Journal of Geosciences of China*, 2002, 14(1): 17-24.
- [8] 陈伟光,魏柏林,赵红梅,等. 珠江三角洲地区新构造运动[J]. 华南地震,2002,22(1): 8-18.
CHEN W G, WEI B L, ZHAO H M, et al. The neotectonic movement in Pearl River Delta area [J]. *South China Journal of Seismology*, 2002, 22(1): 8-18.
- [9] 宋方敏,汪一鹏,李传友,等. 珠江三角洲部分断裂晚第四纪垂直位移速率[J]. 地震地质,2003,25(2): 203-210.
SONG F M, WANG Y P, LI C Y, et al. Late Quaternary vertical dislocation rate on several faults in the Zhujiang Delta area [J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(2): 203-210.
- [10] 姚衍桃,詹文欢,刘再峰,等. 珠江三角洲的新构造运动及其与三角洲演化的关系[J]. 华南地震,2008,28(1): 29-40.
YAO Y T, ZHAN W H, LIU Z F, et al. Neotectonic of the Pearl River Delta and its relationship with the deltaic evolution [J]. *South China Journal of Seismology*, 2008, 28(1): 29-40.
- [11] 董好刚,黄长生,陈雯,等. 珠江三角洲环境地质控制性因素及其问题分析[J]. 中国地质,2012,39(2): 539-549.
DONG H G, HUANG C S, CHEN W, et al. The controlling factors of environment geology in the Pearl River Delta Economic Zone and an analysis of existing

- problems [J]. *Geology in China*, 2012, 39 (2): 539-549.
- [12] 任镇寰, 叶秀薇, 韦明昌, 等. 珠江三角洲地区重力资料解释的深部断裂系统[J]. *四川地震*, 2011, (4): 29-34.
REN Z H, YE X W, WEI M C, ET al. Deep fault distribution interpreted by gravity Data in the Pearl River Delta region [J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 2011, (4): 29-34.
- [13] 乔计花, 刘天佑, 任镇寰. 重力资料精细处理及在珠江三角洲地震灾害研究中的应用[J]. *地质灾害与环境保护*, 2003, 14(4): 77-80.
QIAO J H, LIU T Y, REN Z H. Gravity data elaborate processing and its application in the earthquake disaster study of Zhujiang Delta [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2003, 14(4): 77-80.
- [14] 罗玉芬, 潘飞儒, 徐行, 等. 海底地磁观测技术方法和展望[J]. *华南地震*, 2017, 37(3): 63-68.
RUO Y F, PAN F R, XU X, et al. Research and prospect of the underwater geomagnetic observation technology [J]. *South China Journal of Seismology*, 2017, 37(3): 63-68.
- [15] BI L S, REN Z H, YE X W, et al. Interpretation of the west segment of the coastal fault zone in the coastal region of South China based on the gravity data [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2018, 9(2): 142-150.
- [16] 毕丽思, 任镇寰, 叶秀薇, 等. 基于重力资料从深部断裂系统讨论湛江湾地区的发震构造[J]. *地震地质*, 2018, 40(6): 1332-1348.
BI L S, REN Z H, YE X W, et al. Discussion on the seismogenic structure of Zhanjiang Bay area from the view of deep fault system interpreted based on the gravity data [J]. *Seismology and Geology*, 2018, 40(6): 1332-1348.
- [17] 翁钊强, 周坤隆, 林群, 等. 珠江口海陆联测-香港区域子台噪声测试及其观测效果分析[J]. *华南地震*, 2018, 38(3): 105-111.
WENG Z Q, ZHOU K L, LIU Q, et al. Co-survey of land and sea at the Pearl River Estuary - noise test and observation effect analysis of substations in Hongkong region [J]. *South China Journal of Seismology*, 2018, 38(3): 105-111.
- [18] LV Z Y, QIU X L, LV J S, et al. Crustal structure beneath the east side of Pearl River Estuary from onshore-offshore seismic experiment [J]. *International Geology Review*, 2020, 62 (7/8): 1057-1069.
- [19] 陈恩民, 黄泳茵. 华南十九次强震暨南海北部陆缘地震带概述[J]. *华南地震*, 1984, 4(1): 11-32.
CHEN E M, HUANG Y E. The 19th study of the strong earthquakes and seismic belt in the northern continental margin of the South China Sea [J]. *South China Journal of Seismology*, 1984, 4(1): 11-32.
- [20] 丁原章, 常宝琦, 肖安予, 等. 水库诱发地震[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
DING Y Z, CHANG B Q, XIAO A Y, et al. Reservoir-induced earthquakes [M]. Beijing: Seismology Press, 1989.
- [21] 丁祥焕, 王跃东, 叶盛基. 福建东南沿海活动断裂与地震[M]. 福州: 福建科技出版社, 1999.
DING X H, WANG Y D, YE S J. Active faults and earthquakes in southeast coast of Fujian [M]. Fuzhou: Science and Technology Press of Fujian Province, 1999.
- [22] 张项. 珠江口西侧深地震探测与构造研究[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2017.
ZHANG X. Deep seismic sounding and tectonic study on the west side of Pearl River Estuary [D]. Guangzhou: South China Sea Institute of Oceanology of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [23] ZHANG X, YE X W, LV J S, et al. Crustal structure revealed by a deep seismic sounding profile of Baijing-Gaoming-Jinwan in the Pearl River Delta [J]. *Oceanic and Coastal Sea Research*, 2018, 17(1): 1-8.
- [24] 任镇寰, 陈恩民, 潘建雄, 等. 南海北缘地震构造带地震构造标志的研究[M]//海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社, 1988: 78-87.
- [25] 任镇寰, 任奔滔, 罗振暖, 等. 南海北缘北东东向构造活动性研究[J]. *地壳形变与地震*, 1996, 16(2): 27-35.
REN Z H, REN B T, LUO Z N, et al. A study on activity of NEE tectonics on north margin of the South China Sea [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1996, 16(2): 27-35.
- [26] 马宗晋, 王乾盈, 徐杰, 等. 台湾海峡两岸横向构造的对比研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(6): 441-451.
MA Z J, WANG Q Y, XU J, et al. Comparison study on the transverse structures across Taiwan Strait [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(6): 441-451.
- [27] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988.

(责任编辑 秦社彩)