



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：上海及邻区重磁异常与深部构造特征研究

作者：胡祥云，谢建磊，张恒磊

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026130

投稿时间：2026-09-05

录用时间：2026-09-28

预出版时间：2026-09-30

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

引用格式: 胡祥云, 谢建磊, 张恒磊, 2026. 基于重磁异常研究上海及邻区主要断裂与深部构造特征[J].地质力学学报, 32 (2) 000-000. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026130

Citation: HU X Y, XIE J L, ZHANG H L, 2026. Study of Main Faults and Deep-Seated Structural Characteristics of Shanghai and Adjacent Areas Based on Gravity and Magnetic Anomalies[J].Journal of Geomechanics, 32 (2) 000-000. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026130

基于重磁异常研究上海及邻区主要断裂与深部构造特征

胡祥云^{1,2}, 谢建磊³, 张恒磊^{1,2}

HU Xiangyun^{1,2}, XIE Jianlei³, Zhang Henglei^{1,2}

1.中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;

2.中国地质大学(武汉)地质探测与评估教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3.上海市地质调查研究院, 上海 200072

1. School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China

Study of Main Faults and Deep-Seated Structural Characteristics of Shanghai and Adjacent Areas Based on Gravity and Magnetic Anomalies

Abstract: [Objective] Shanghai and its neighboring regions are key to China's economic development strategy. As this is a region prone to earthquakes that are perceptible to humans, studies of the crustal structure are attracting attention. Despite the reported results, substantial debate remains regarding the spatial distribution of the deep-seated major faults (e.g. Hu-Su and Jiang-Shao faults) and their extend into the East China Sea. [Methods] Using aeromagnetic and aerogravity data, three-dimensional inversion is employed to construct crustal density and magnetization models for the study area. [Results] The corresponding analysis of gravity and magnetic anomalies revealed that the sources of these anomalies are unrelated but exhibit accompanying features in with absolute correlation coefficients lower than 0.4. Medium-to-strong magnetism is widely distributed along density anomaly gradient zones, suggesting that intrusive medium-to-acidic granites along the margins of uplifted structures are the primary factors causing the magnetic anomalies. [Conclusions] This study provides critical quantitative constraints on the faults and a crustal ring structure. Examining the gravity and magnetic features of the Hu-Su and Jiang-Shao fault segments entering the East China Sea indicates that these two faults extend to a depth of 20 km and control the tectonic framework of the Shanghai region. In addition, a crustal ring structure in the Yangtze Estuary is revealed based on the density model. [Significance] By highlighting the contributions of inverted 3D models derived from magnetic and gravity data, our findings underscore the need to update interpretations via 3D inversions on high-quality potential data, which is vital for studying the crustal structure in the region.

Keywords: magnetic anomaly; gravity anomaly; three-dimensional inversion; fault analysis; density contrast

摘要: 为研究上海及邻区的深部结构特征、厘定区内湖苏断裂和江绍断裂的空间展布尤其是入海后的延伸方向, 利用航空重力与航空磁力数据, 采用重磁异常三维物性反演构建了该区地壳剩余密度模型及磁化强度模型。通过分析区内地壳结构特征及其与重磁异常的对应关系表明区内多数重磁源不相关但存在较显著的伴生特征, 即中强磁性广泛分布于密度异常梯度带上。上海及邻区隆升与凹陷构造是产生局部重力异常的主要因素之一, 推测隆起构造边缘沿断裂构造侵入的中酸性花岗岩是引起伴生磁异常的主

基金项目: 国家自然科学基金项目(42220104002); 国家重大专项(2024ZD1001907); 武汉市科技计划项目(2024030803010169)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (42220104002), a National Science and Technology Major Project (2024ZD1001907), and a Wuhan Science and Technology Achievement Transformation Project (2024030803010169).

第一作者: 胡祥云(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事电磁勘探教学与科研。Email: xyhu@cug.edu.cn

通信作者: 张恒磊(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事重磁勘探教学与科研。Email: h.l.zhang@cug.edu.cn

收稿日期: 2026-09-05; 修回日期: 2026-09-27; 录用日期: 2026-09-28; 网络出版日期: 2026-09-30 责任编辑: 范二平

Received: 2026-09-05; Revised: 2026-09-27; Accepted: 2026-09-28; Available online: 2026-09-30; Handling Editor: Fan Erping

要因素。三维密度与磁性模型揭示湖苏断裂与江绍断裂两侧存在显著的物性异常,呈北东向延伸入海,其中湖苏断裂倾向南东向、江绍断裂倾向北西向,影响深度达 20 km。此外,三维密度异常识别了长江口地壳环形构造,该环形构造挟持于湖苏断裂与江绍断裂之间,反映中下地壳凹陷的宏观特征。研究成果指出重磁异常三维物性反演能够为深部结构探测提供丰富信息,揭示了湖苏断裂和江绍断裂两侧密度异常与磁性异常的变化特征,为该区深部结构研究提供了新线索。

关键词: 磁异常;重力异常;三维反演;断裂分析;剩余密度

中图分类号: P631.2 文献标识码: A 文章编号:

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026130

0 引言

上海及其邻近地区是中国经济发展战略要地之一,城市高度集中,人口十分稠密。该区主要位于华北地震区,南部舟山群岛地区毗邻华南地震区,区内弱震、有感地震频发,偶有中强震、强震发生。作为控制本区地震构造区划分的 2 条主要断裂——湖州-苏州断裂(湖苏断裂)和江山-绍兴断裂(江绍断裂),将上海及其邻近地区分为 3 个北东向的一级地震构造区,分别为勿南沙-南通地震构造区、沪杭地震构造区和舟山-宁波地震构造区,并以苏北沿岸断裂带的西支和东支为界,将勿南沙-南通地震构造区和沪杭地震构造区分为 2 个亚区(谢建磊,2018)。因此,研究该区地壳结构异常,厘清湖苏断裂、江绍断裂的空间分布规律,对地壳稳定性评价、地震监测等具有理论意义,对提升上海市深部地质结构调查、地质安全风险管控、城市韧性、发展规划和可持续发展水平具有重要现实意义。

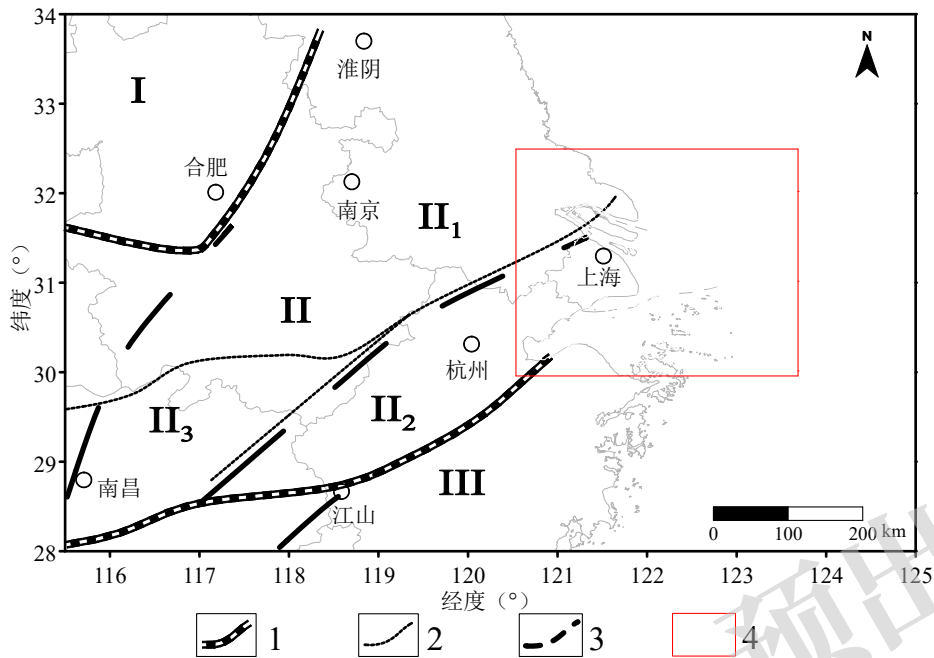
近年来,相关学者利用背景噪声成像(冯策等,2024)、体波双差成像(于海英等,2021)、大地电磁(于鹏等,2008)、重磁(朱子沾和徐关生,1990;Zhu et al.,2022;尚鲁宁等,2024)等方法研究了上海地区深部结构,其中浅层地震勘探在上海陆域开展了较系统的应用,主要勘探深度位于 1000 米以浅。区内湖苏断裂和江绍断裂的空间展布特征受到广泛关注,但受资料限制,已有研究大多数针对上海陆域,对该断裂的空间延伸认识还存在很大争论,尤其是涉及到江绍断裂入海后的走向问题,还存在很大的不确定性。湖苏断裂是一条重要的构造边界,反映扬子准地台边缘的裂陷演化历史。姚保华等(2007)利用大地电磁测深研究表明,湖苏断裂西侧电阻率较东侧低,低阻异常深度范围为 13~15km,形成西低东高形态的壳内高导层。江绍断裂作为扬子地块与华夏地块的重要分界线,其延伸问题对于理解华南大陆的构造演化具有重要意义。关于江绍断裂在杭州湾入海后的延伸方向,地质学界存在不同认识,主流观点认为该断裂进入杭州湾后以北东走向延伸入海(顾勤平等,2022),部分学者认为该断裂在穿过杭州湾后发生转折,转为北东东向经过衢山岛后,再次转折呈北东向延伸入海(李起彤和毛正毅,1986)。总体而言,由于地壳结构的复杂性、断裂两侧物性结构的不均匀性与不连续性以及不同研究依据的方法不同,反映的断裂水平位置可能与断裂深度特征有关,宏观上表现为湖苏断裂及江绍断裂的空间展布存在差异。

重磁数据覆盖面广,横向分辨率高,在深部地壳结构研究中应用广泛(杨文采等,2022),尤其是在研究程度较低的海域能够发挥重要作用(Zhu et al.,2022;黄子强等,2025;Zhao et al.,2026b)。文章以上海及其相邻地区为研究对象,通过收集区内航空重力异常与航磁异常资料,分析了其重磁异常特征,指出该区主体重磁异常不相关但呈伴生关系;通过重磁异常三维反演为断裂(湖苏断裂、江绍断裂)识别与长江口地壳环形构造识别提供了定量约束。

1 区域构造与重磁异常特征

研究区大地构造位置处于扬子准地台的东部边缘(图 1),地跨下扬子准地台(江绍断裂为界)和华南褶皱系。根据区域新构造活动特征,区内可分为下扬子下沉凹陷区和皖浙上升隆起区,东南隅海域为东海持续沉降区。燕山运动奠定了本区的质地貌骨架,形成了一系列以北东向为主、北西向为辅的断块构造,隆起部分形成山地,遭受强烈剥蚀;陷落部分构成盆地,接受来自附近山地的巨厚晚白垩纪至古近系堆积,新生代晚期以来的沉积厚度以江苏角直盆地最大,达 600 余米,上海地层沉积厚度为 200~400m,且由南向北逐渐增厚(火恩杰等,2004)。区内构造以断裂为主,呈北东东至近东西向、北北东向、北北西向及北西西向几组,有些由

数条断裂组成断阶、地堑、地垒式组合。



1—一级大地构造单元界线；2—二级大地构造单元界线；3—断裂（带）；4—研究区

I—华北地台；II—扬子准地台；II₁—下扬子台褶带；II₂—浙西台褶带；II₃—江南台背斜；III—华南地槽系

1—Boundary of first-order tectonic unit; 2—Boundary of second-order tectonic unit; 3—Fault (zone); 4—Study area

I—North China platform; II—Yangtze paraplatform; II₁—Lower Yangtze platform-fold belt; II₂—Western Zhejiang platform-fold belt; II₃—Jiangnan platform-anticlinorium; III—South China geosynclinal system

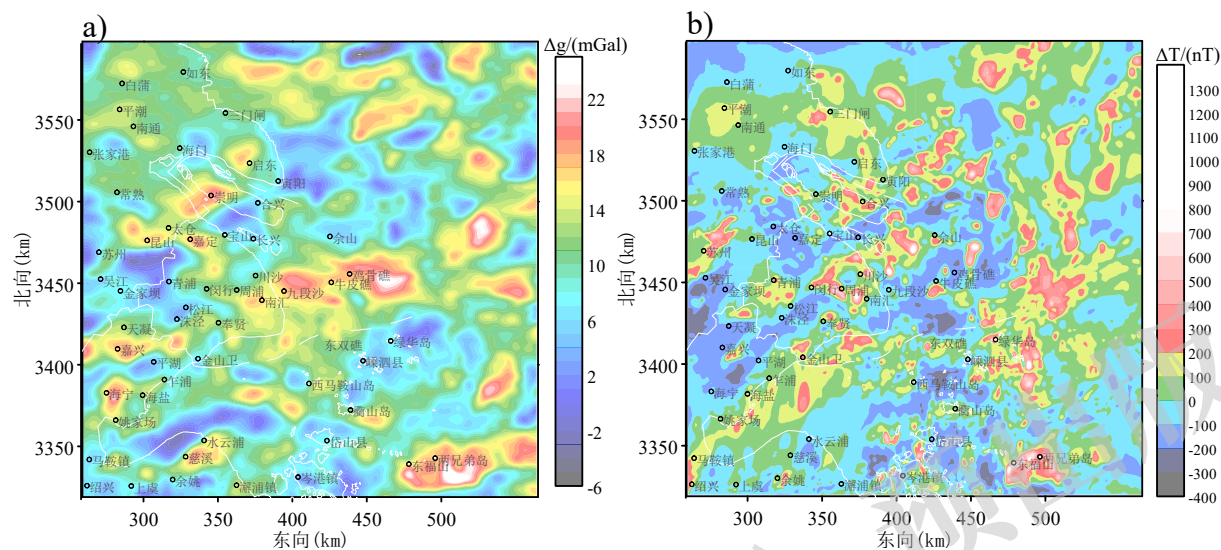
图1 区域大地构造单元划分图（据火恩杰等，2004 修改）

Fig 1 Subdivision of regional tectonic units (Huo et al., 2004)

研究区侵入岩和喷出岩（安山岩、花岗岩、闪长玢岩、闪长岩）表现为中强磁化率特征，侵入岩的磁性随成分由酸性向基性变化而增强，沉积岩的磁化率通常较低（Zhu et al., 2022）。区内基性岩浆岩、中酸性岩浆岩和酸性岩浆岩分别表现为高密度（ $2.86\sim 2.96\text{ g/cm}^3$ ）、中等密度（ $2.61\sim 2.68\text{ g/cm}^3$ ）和低密度（ $2.51\sim 2.64\text{ g/cm}^3$ ），主要界面密度差异包括震旦系一下古生界碳酸盐岩（密度差为 0.2 g/cm^3 ）、前震旦系基底起伏（密度差为 $0.1\sim 0.2\text{ g/cm}^3$ ）、莫霍面起伏（密度差为 0.33 g/cm^3 ），其中莫霍面起伏是引起区域重力异常的主要贡献者。此外，沉积盆地因埋深不同引起压实作用的差异，也会引起盆地内沉积岩密度的较大差异（Zhang et al., 2020）。区内局部重力异常、航磁化极异常（ ΔT ）如图2所示，其中局部重力异常是将布格重力异常向上延拓 20 km 后作为区域场分离后得到的，主要反映壳内密度变化。 ΔT 强度变化在 $-400\sim 1300\text{ nT}$ 之间，其中挟持于湖苏断裂与江绍断裂间的北东向磁异常区，即环常熟、启东、鸡骨礁、金山、绍兴形成一系列正负异常变化带，为燕山期花岗闪长岩和花岗岩、上侏罗统火山岩、下元古宇金山群变质岩组成形成的中强磁异常；而区内安角、松江等盆地则形成弱磁异常。东部长江口外近南北向条带状磁异常区由多组近南北走向的条带状磁异常组成，可能反映与断裂活动紧密相关的侵入岩体的影响。区内局部重力场强度变化在 $-8\sim 26\text{ mGal}$ 之间。其中中部奉贤—南汇—牛皮礁—鸡骨礁一带存在显著的局部高重力异常，最大幅值约 24 mGal ，反映了壳内高密度物质的影响。区内北东侧至东侧存在一条显著的中强环形重力异常带，可能反映基底隆起的影响。总体上看，研究区普遍发育轴向北东向分布的重力高值区和重力低值区，多由梯度带或线状过渡带分割，主要对应于基底隆起区和坳陷区，由震旦系一下古生界碳酸盐岩、前震旦系基底等构成的高密度物质隆起是引起局部重力异常高的主要因素，由新近系盆地较厚的沉积层、花岗岩等低密度异常体产生了显著的低重力异常，部分铁镁质含量较高的基性—超基性岩体则产生显著的局部高重力异常特征。

由重磁异常对应分析结果（图3）可以看出，除东福山—两兄弟岛区域外，区内高重力异常区与中强磁异

常区皆对应较低的相关系数（绝对值小于 0.4）。根据管志宁（2005）研究表明，当相关系数的绝对值小于 0.5 则可认为重磁异常不同源。部分低重力异常区显示高相关系数（大于 0.4）、部分高重力异常区显示负相关（小于-0.4），表示引起重力异常的场源无磁性。局部地区存在高重力异常对应较高的相关系数，推测为中基性岩体的反映；而局部地区低重力异常对应较高的负相关，则为中酸性岩体的反映。



Δg —重力异常； ΔT —磁异常

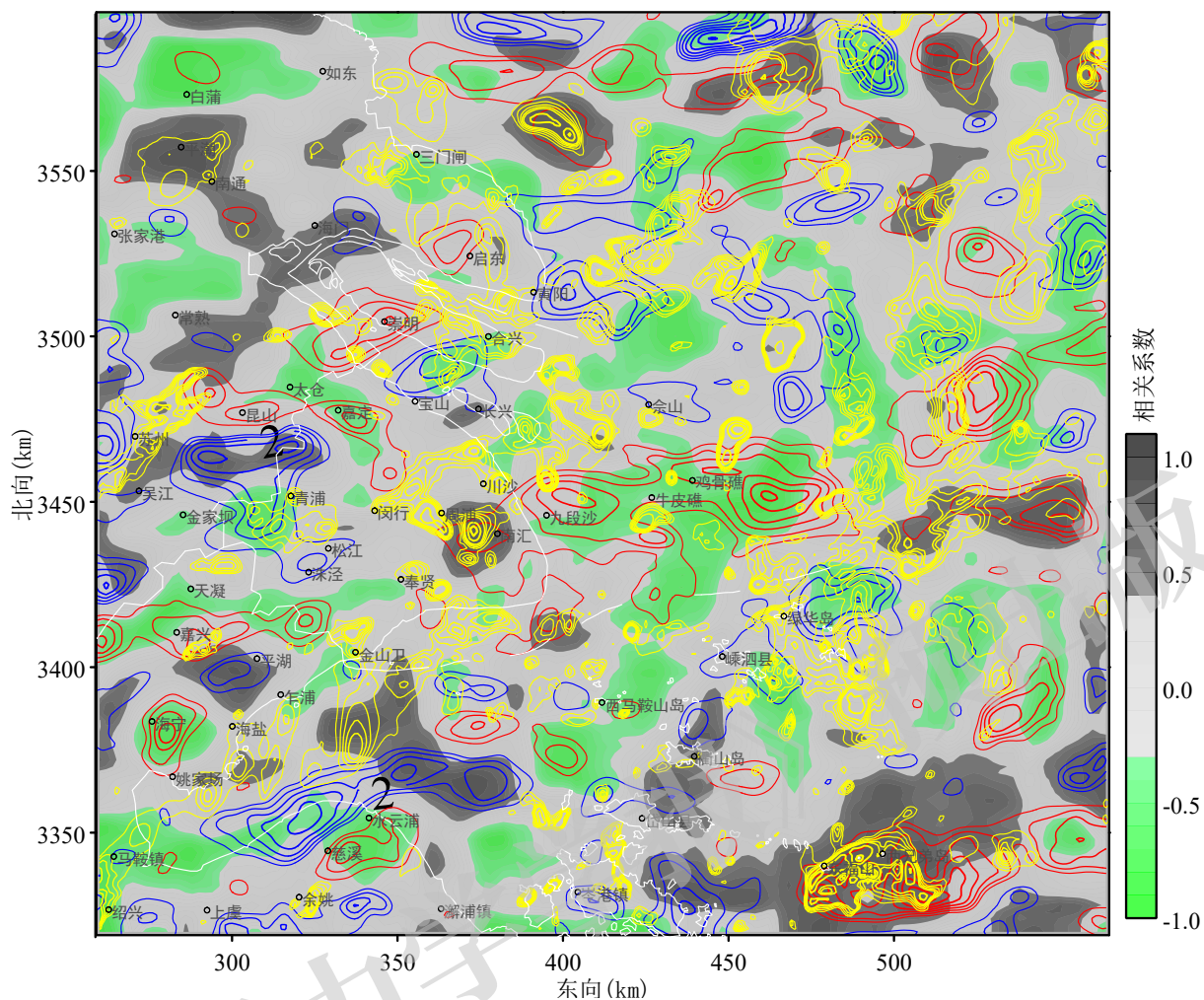
a—局部重力异常；b—化极磁异常

图2 上海及其相邻地区重磁异常图

Fig. 2 Gravity and magnetic anomalies

(a) Residual gravity anomaly; (b) Magnetic anomaly with reduction to the pole (RTP)

Δg —gravity anomaly; ΔT —magnetic anomaly



底图等值线表示相关系数；黄色、红色、蓝色等值线分别表示高磁异常（幅值大于 100nT）、高重力异常（大于 14mGal）、低重力异常（小于 6mGal）

图3 重磁异常对应分析

Fig. 3 Correlation of gravity and magnetic anomalies

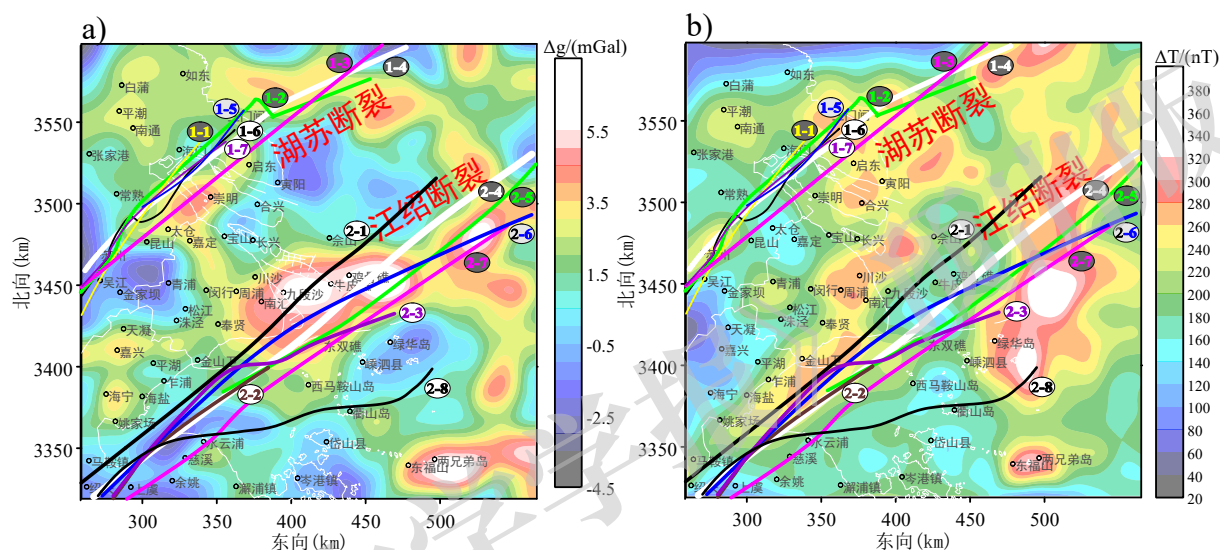
The background contours represent correlation coefficients; the yellow, red, and blue contours represent high magnetic anomalies (>100 nT), high gravity anomalies (>14 mGal), and low gravity anomalies (<6 mGal), respectively.

2 断裂分析与深部构造

为突出宏观异常特征，利用重磁异常向上延拓 10 km 压制浅部短波长异常的影响。从延拓结果（图 4）可以看出，湖苏断裂和江绍断裂宏观上位于异常梯度带、错断带或异常的鞍部。传统方法通常计算 4 个方向的方向导数以突出垂直求导方向的构造边界，为突出场源特征，文章采用 NAV-Edge 方法识别重磁异常源边界。NAV-Edge 方法不直接进行微分计算，相对传统导数计算更加稳定，且通过采用各向异性算子能够突出不同构造方向的地质信息，其零值线理论上表示场源边界（Zhang et al., 2014）。利用 NAV-Edge 方法识别出的重磁异常细节信息如图 5 所示，湖苏断裂、江绍断裂主要对应重磁异常 NAV-Edge 的零值或者鞍部。

相比传统向上延拓、边界识别等方法，重磁异常三维物性反演能够显著改善原始信号的分辨能力（Zhao et al., 2025），同时根据物性的变化为断裂分析与深部构造研究提供更直接的依据（Zhu et al., 2022；戴梦雪等，2025；李为凯等，2025；Li et al., 2026；刘定美等，2026；余雅文等，2026；Zhao et al., 2026b）。尽管存在纵向叠加异常体等引起的多解性，但三维物性反演可以宏观确定场源的深度、走向与倾向等信息，如 Geng et al. (2024) 利用卫星重力构建了月球风暴洋下方岩浆结构的三维密度模型，低密度异常揭示出 3 条狭窄的近水平层状岩浆通道，长度达 80~150km，从近地表延伸至约 10 km 深度。文章利用 Mag3Dimaging 软件

反演重磁异常分别构建上海及邻区的地壳密度异常模型、磁性模型，其中地磁倾角、偏角分别为 45° 、 -4.8° ；不考虑剩磁，模型空间单元尺寸为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ，共计设置 50 层即反演最大深度 50 km，约束条件仅设置磁化强度数值 ≥ 0 ，反演结果水平切片如图 6、图 7 所示。湖苏断裂以北密度变化较为平缓，10 km 深度磁化强度切片显示弱磁性，表明其为以长英质岩石为主的中—上地壳结构。湖苏断裂与江绍断裂之间密度异常呈北东向条带状，且正、负密度异常相间伴生，主要反映了隆起与凹陷的构造特征；在密度异常变化梯度带普遍发育北东走向条带状中强磁性异常，延伸至长江口外，推测中酸性岩浆沿隆升构造周缘的断裂系统侵入产生中强磁性异常，当岩浆储量达一定规模时也会产生显著的低重力异常。江绍断裂以南密度异常呈北东东向，其中长河盆地东侧部分折转为南东向，主要密度变化集中于中—上地壳；该区磁性变化相对平缓，西马鞍山岛—衢山岛—两兄弟岛一线以东呈现北北西向的串珠状中强磁性条带，该类中强磁性异常主要分布于低密度异常带，推测主要为侵入的中酸性花岗岩影响导致。



图中不同颜色的线条表示推测的 2 条断裂位置，编号及参考文献分别为：1-1（冯策等，2024），1-2（刘建达等，2009），1-3（谢建磊，2018），1-4（此次推测），1-5（尚鲁宁等，2024），1-6（顾澎涛，1993），1-7（张颐彪等，2025）；2-1（顾勤平等，2022），2-2（陈涛等，2023），2-3（汪发祥，2016），2-4（此次推测），2-5（王舒畋和李斌，2009），2-6（尚鲁宁等，2024），2-7（Zhu et al., 2022），2-8（李起彤和毛正毅，1986）

 Δg —重力异常; ΔT —磁异常

a—局部重力异常向上延拓 10km; b—化极磁异常向上延拓 10km

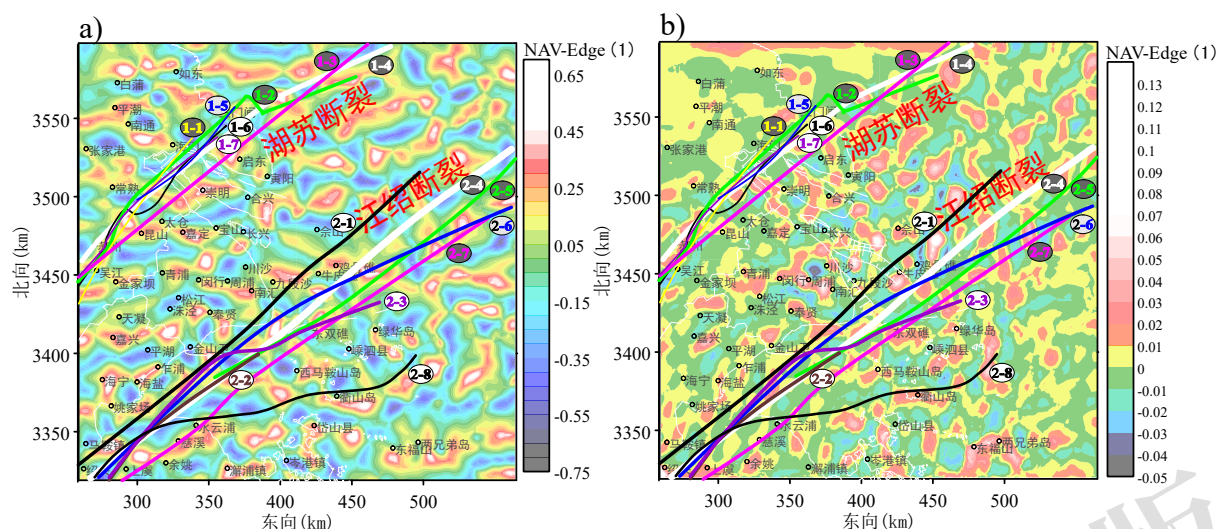
图4 上海及其相邻地区重磁异常向上延拓图

Fig. 4 Upward continuation of gravity and magnetic anomalies

(a) and (b) are respectively, the upward continuation of the residual gravity anomaly and RTP over a distance of 10 km.

Δg —the gravity anomaly; ΔT —the magnetic anomaly

The colored lines indicate two inferred fault locations; the corresponding labels and references are: 1-1 Feng et al.(2024), 1-2 Liu et al. (2009), 1-3 Xie (2018), 1-4 this study, 1-5 Shang et al. (2024), 1-6 Gu (1993), 1-7 Zhang et al. (2025); 2-1 Gu et al. (2022), 2-2 Chen et al. (2023), 2-3 Wang (2016), 2-4 this study, 2-5 Wang and Li (2009), 2-6 Shang et al. (2024), 2-7 Zhu et al. (2022), 2-8 Li and Mao (1986).



图中不同颜色的线条表示推测的2条断裂位置，编号及参考文献见图4

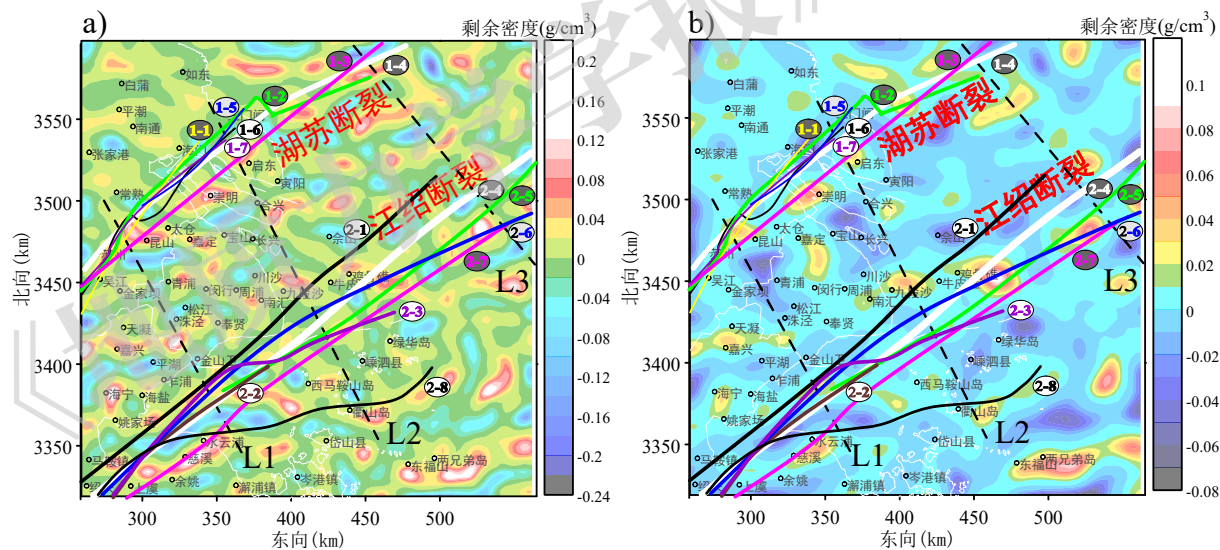
a—局部重力异常；b—化极磁异常

图5 上海及其相邻地区重磁异常边界识别

Fig. 5 The edge detections of the gravity and magnetic anomalies

(a) NAV-Edge of the residual gravity anomaly; (b) NAV-Edge of the RTP

The colored lines indicate the inferred locations of two faults; see Figure 4 for numbering and references.



图中不同颜色的线条表示推测的2条断裂位置，编号及参考文献见图4；图中黑色虚线L1、L2、L3表示三条剖面位置

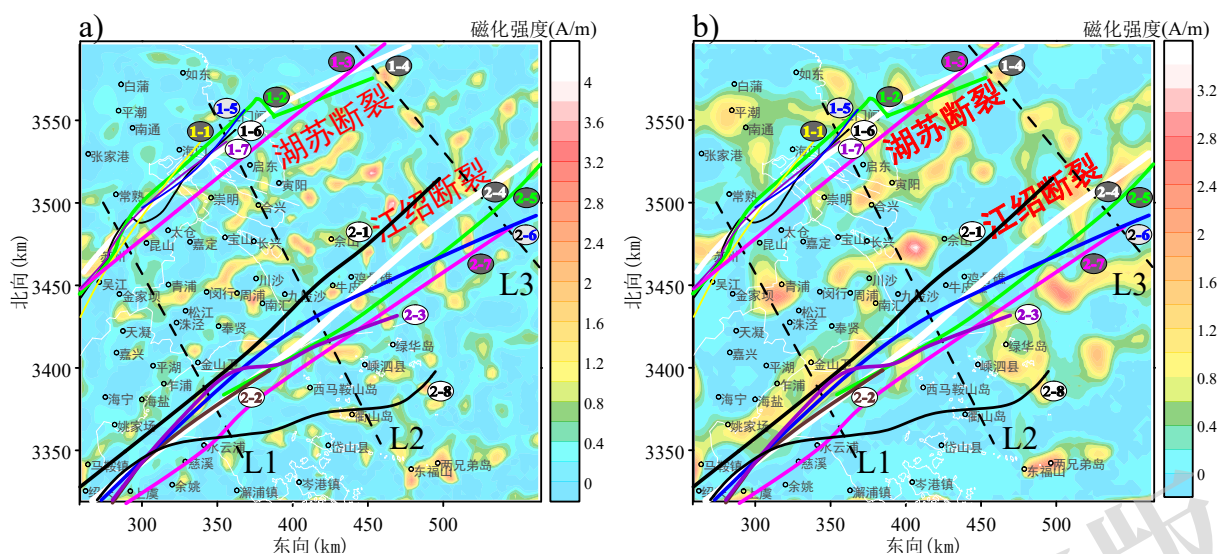
a—10 km 深度；b—20 km 深度

图6 上海及其相邻地区密度异常水平切片图

Fig. 6 The horizontal slices of the density contrast

(a) depth of 10 km; (b) depth of 20 km

The colored lines in the figure indicate the locations of two inferred faults (see Figure 4 for numbering and references), while the black dashed lines L1, L2, and L3 indicate the locations of three profiles.



图中不同颜色的线条表示推测的2条断裂位置，编号及参考文献见图4；图中黑色虚线 L1、L2、L3 表示三条剖面位置。

a—10km 深度；b—20km 深度

图7 上海及其相邻地区磁化强度异常水平切片图

Fig. 7 Horizontal slices of the magnetic field strengths

(a) depth of 10 km; (b) depth of 20 km

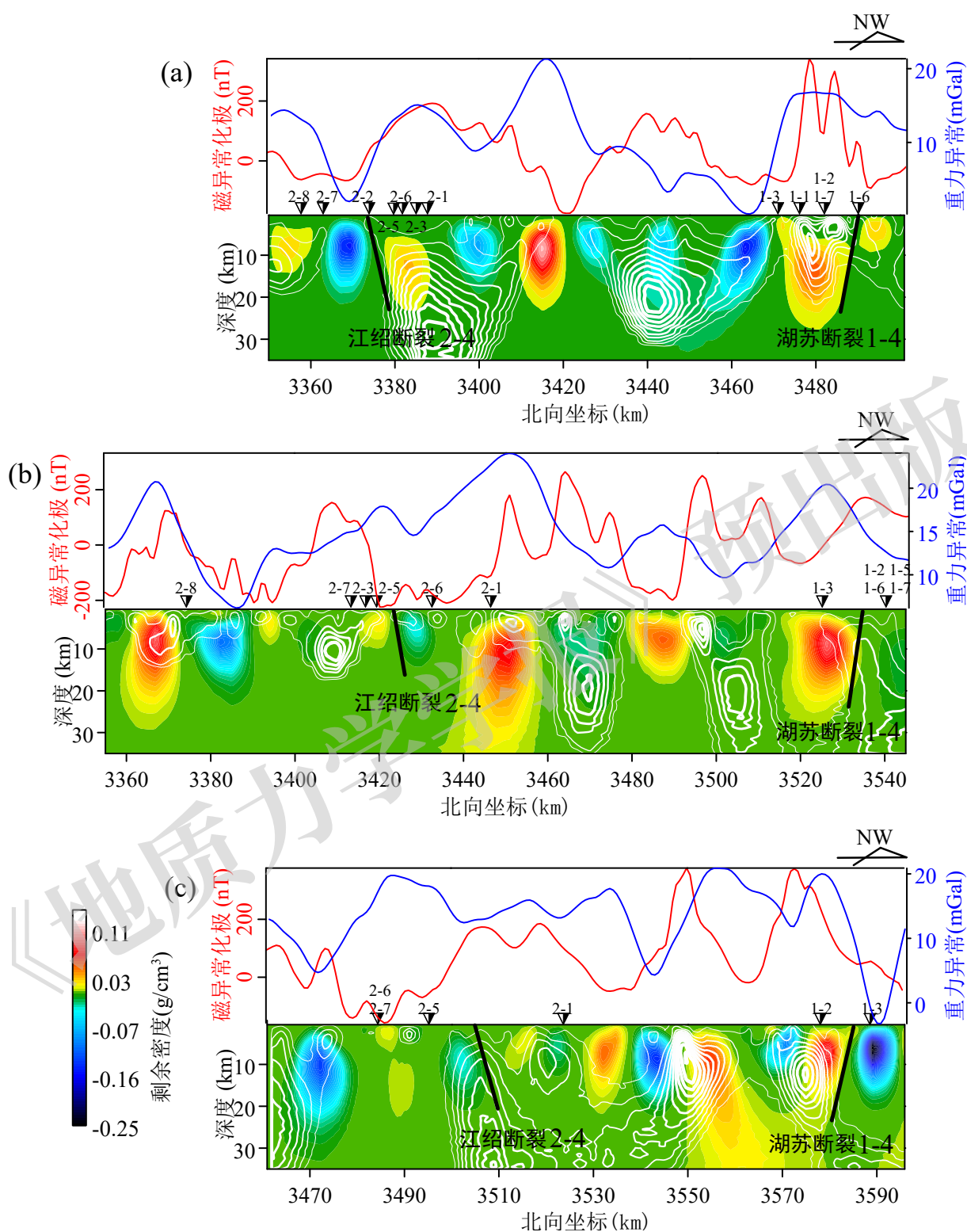
The colored lines in the figure indicate the locations of two inferred faults (see Figure 4 for numbering and references), while the black dashed lines L1, L2, and L3 indicate the locations of three profiles.

穿过湖苏断裂和江绍断裂的3条剖面（L1、L2、L3）的重磁异常以及反演结果深度切片如图8所示。L1剖面依次穿过水云浦隆起、长河盆地、杭州湾北部隆起、金山卫凹陷、平湖-朱泾隆起、北桥盆地-角直盆地、昆山隆起。此次推测的江绍断裂（编号2-4）位于长河盆地与杭州湾北部隆起之间，断裂两侧密度存在显著差异，且沿断裂侵入发育大规模的中酸性岩体，形成中等强度磁性异常；以往推测的江绍断裂（编号2-1）位于杭州湾北部隆起的北侧（顾勤平等，2022）、编号2-7断裂位于水云浦隆起北侧（Zhu et al., 2022），其他推测的江绍断裂位置皆位于高密度异常体上方。剖面中部北桥盆地-角直盆地显示的中上地壳显著低密度异常与中强磁性异常相对应，推测为中酸性花岗岩体的响应。剖面北部为昆山隆起对应的高密度异常，此次推测的湖苏断裂（编号1-4）位于该隆起的北侧，与以往推测的断裂（编号1-6；顾澎涛，1993）位置一致；编号1-3断裂位于昆山隆起的南侧（谢建磊，2018），其他推测的湖苏断裂皆位于昆山隆起对应的高密度异常体上方。L2剖面依次穿过衢山岛隆起、衢山岛北部凹陷、西马鞍山岛隆起、东双礁隆起、九段沙隆起、九段沙北部凹陷、合兴南部隆起、合兴凹陷、启东隆起，此次推测的江绍断裂（编号2-4）位于东双礁高密度异常北侧，断裂两侧密度异常显著。编号2-8断裂位于衢山岛隆起北侧（李起彤和毛正毅，1986）、编号2-7断裂位于东双礁隆起南侧（Zhu et al., 2022）、编号2-6断裂位于东双礁北部凹陷北侧（尚鲁宁等，2024），其他推测的江绍断裂位置皆位于高密度异常体上方。剖面中段至北段依次分布九段沙高密度异常、合兴南部高密度异常、启东高密度异常，并间隙伴生中强磁性异常且对应低密度异常，推测为中酸性花岗岩的影响。此次推测的湖苏断裂（编号1-4）位于启东高密度异常北侧梯度带上，而其他推测的断裂位于高密度异常体上方、或低密度异常体上方。L3剖面位于长江口外，由图8c可以看出，此次推测的江绍断裂、湖苏断裂皆位于密度变化梯度带上，而其他断裂位于高密度异常或低密度异常上方。综上所述，此次推测的江绍断裂、湖苏断裂位于密度异常梯度带，伴生中强磁性异常，推测的断裂产状与密度异常的分布特征吻合。L2剖面显示的江绍断裂重磁异常特征较L1和L3剖面显著偏弱，推测这是由于华南大陆挤压和伸展过程改造了江绍断裂的深部结构，使得密度异常与磁性异常趋于平缓。

此外，从反演结果看，湖苏断裂两侧重磁异常显著，密度与磁性异常规模较大，延伸至中一下地壳。结合

已有研究认识，该断裂在长期内控制了两侧地区的地质演化，具有重要的构造区划价值，切割深度较大（火恩杰等，2004）。围绕湖苏断裂、江绍断裂的空间展布，相关研究认为湖苏断裂将研究区分为北西侧的湖州-南通台拱和南东侧的上海断隆（于鹏等，2008）；文章研究表明该断裂两侧密度、磁性异常显著，影响深度达20km，与已有研究的断裂两侧速度异常相对应（冯策等，2024）。基于密度异常与磁性异常，文章分析江绍断裂位置及其入海后的延伸问题，该断裂两侧亦存在显著的密度与磁性差异，影响深度至中一下地壳。华南大陆挤压和伸展过程对江绍断裂深部结构的改造使得断裂沿线局部地区物性差异不显著，一定程度上造成了重磁解释结果的不连续性。通过联合波速异常、地壳平均泊松比等资料，能够支撑文章推测的江绍断裂空间位置及产状等信息。

《地质力学学报》预出版



图中白色等值线表示磁化强度为0.1~2.0A/m；黑色线条表示此次推测的断裂；带编号的倒三角形表示前人推测的断裂位置（具体说明见图4）

a—L1剖面重磁异常及反演的密度异常与磁化强度异常切片；b—L2剖面重磁异常及反演的密度异常与磁化强度异常切片；c—L3剖面重磁异常及反演的密度异常与磁化强度异常切片

图8 综合地球物理剖面图

Fig. 8 Integrated geophysical profiles

(a), (b), (c) are the profiles of L1, L2, and L3 with gravity and magnetic anomalies and the inverted density contrast and magnetic

magnetization. The black lines show the inferred faults in this study.

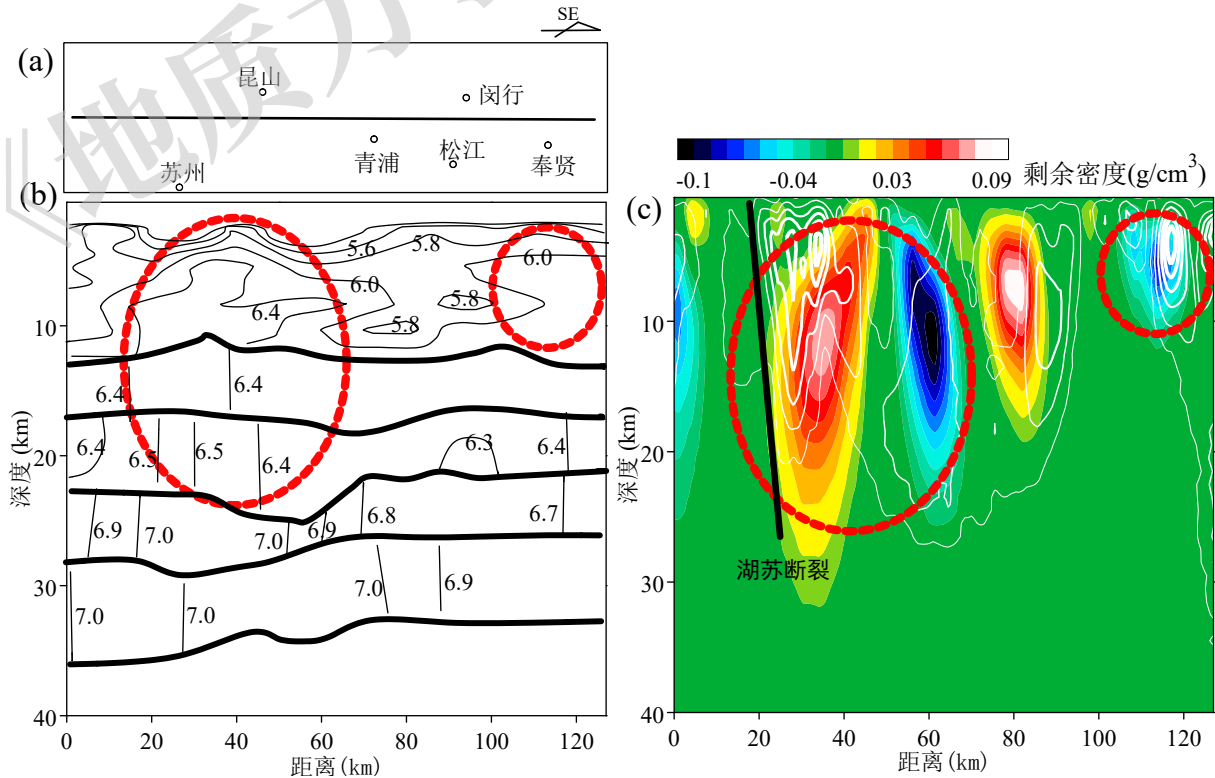
In the figure, the white contours represent magnetic field strengths of 0.1–2.0 A/m; the black lines indicate faults inferred in this study; and the numbered inverted triangles mark fault locations inferred by previous researchers (see details in Figure 4).

为验证密度与磁性反演结果的客观性，文章选取地震测深大剖面 HQ-13 进行对比。HQ-13 剖面是地质矿产部第六物探大队等研究院所于 1984 年 3—6 月合作完成的安徽符离集—上海奉贤的地震测深大剖面（张四维等，1988），剖面位置如图 9a 所示。该剖面研究成果（白志明，2002）能够为分析此次构建的密度异常模型和磁性模型的客观性提供对比。宏观上该剖面存在 2 处较显著的高波速异常（图 9b 中红色虚线所示范围），分别对应密度异常及磁性异常。

（1）昆山隆起对应横坐标 12~67 km 范围内的高波速异常。该高波速异常规模较大，而密度异常表现为图 9c 横坐标 40km 处的高密度异常以及 60km 处的低密度异常，且密度异常与磁性异常存在较好的对应关系。文章推测隆起构造是引起高密度异常的主要因素，该隆起两侧受断裂活动影响中酸性花岗岩发育，是引起角直凹陷下方显著的低密度异常的主要因素。综上所述，文章推测隆起构造以及隆起带两侧发育的花岗岩共同引起高波速异常。

（2）图 10a 表示地震反演的射线数分布，图 10b 横坐标 85km 处地震波速度呈现浅部和深部分异的显著差异，即 5 km 以浅表现为高波速异常，5 km 以深则表现为显著的低波速异常；而重磁异常反演显示高密度异常与中强磁性异常。根据已有研究（白志明，2002），该处 5~10 km 深部低波速异常位于射线空白区（图 10a 蓝色虚线范围），图 10b 中对应的低波速异常缺乏可信度。因此，文章推测图 10c 横坐标 85 km 处（即青浦周边地区）的高密度异常与磁性异常与浅部的高波速异常相对应，且该高波速异常应向下延深至约 15km 深度。同时，文章认为隆起构造是引起该处高密度异常的主要因素，隆起的边界位置发育花岗岩引起磁性异常。而横坐标 115 km 处显示了奉贤高波速异常，对应显著的低密度异常与中等磁性异常，推测其为中酸性花岗岩的反映。

以上对比表明，文中构建的上海及邻区三维密度、磁性模型与以往研究的速度结构（白志明，2002）具有较好的对应性，且能够为深部结构解释提供更丰富的信息，因此能够为地壳结构解释及断裂划分提供可靠依据。



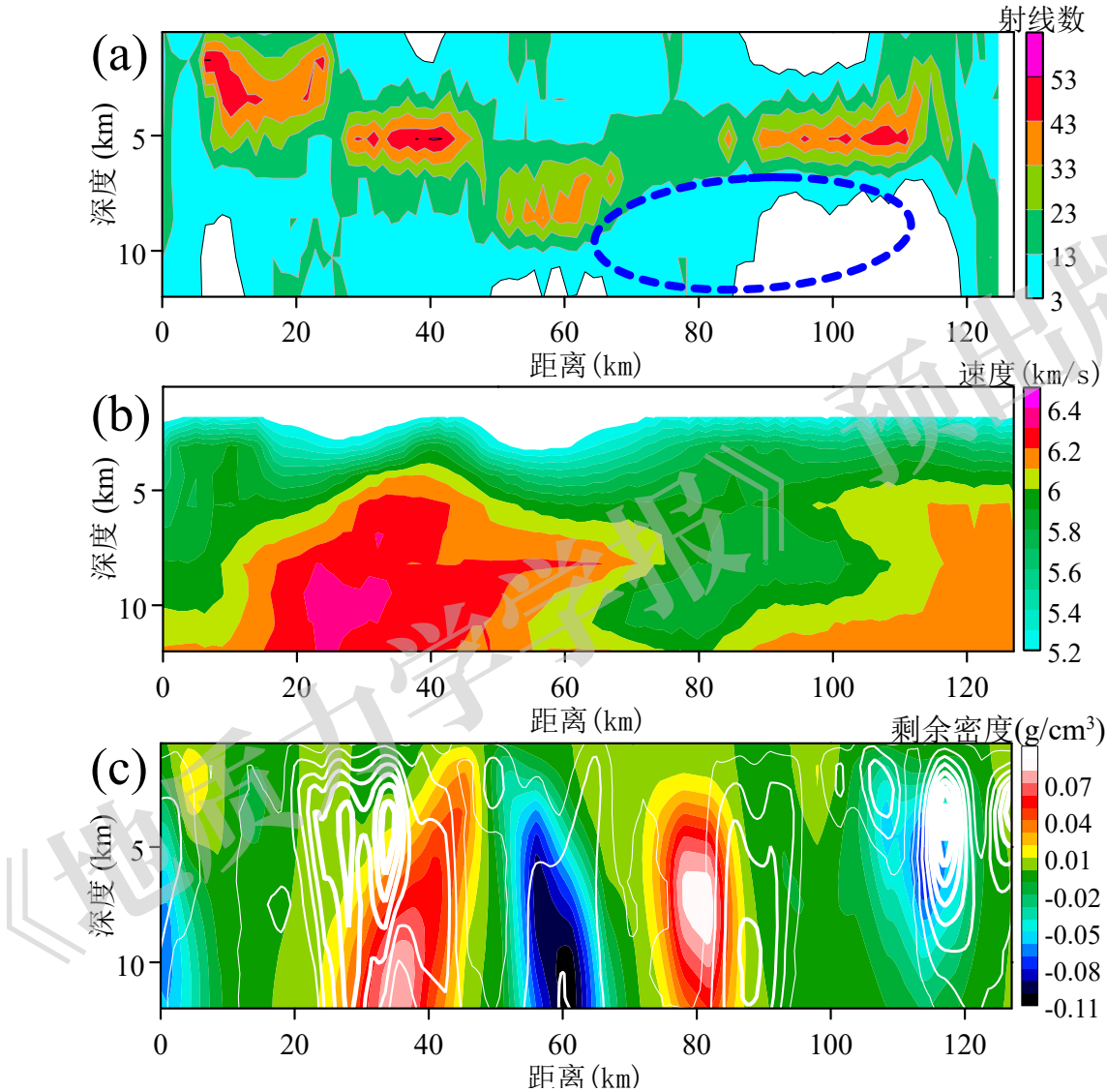
a—剖面位置示意图；b—层析成像得到的地壳波速结构，（图中黑色粗线表示速度分界线，黑色细线表示速度等值线、数值表示地震波速度，km/s；白志

明，2002）；c—此次反演得到的密度异常（图中白色等值线表示磁化强度为0.1~2.0A/m）

图9 地震测深大剖面 HQ-13 综合地球物理图

Fig. 9 Integrated geophysical profile of HQ-13

(a) Schematic map showing the profile location; (b) Crustal velocity structure derived from tomography (the thick black lines represent velocity boundaries; the thin black lines represent velocity isolines; and the marked values are seismic wave velocities in km/s from Bai (2002)); (c) Density contrast obtained by inversion using Mag3D imaging in this study (white contours indicate magnetic field strengths of 0.1–2.0 A/m).



a—地震反演的射线数分布图（蓝色虚线表示反演得到的低波速异常区；白志明，2002）；b—地震走时反演得到的上地壳速度结构（图中数值表示地震波速度，km/s；）红色、蓝色虚线分别表示高、低波速异常；白志明，2002）；c—此次反演得到的密度异常和磁化强度异常（白色等值线表示磁化强度为0.1~2.0A/m）

图10 地震测深大剖面 HQ-13 上地壳综合地球物理异常图

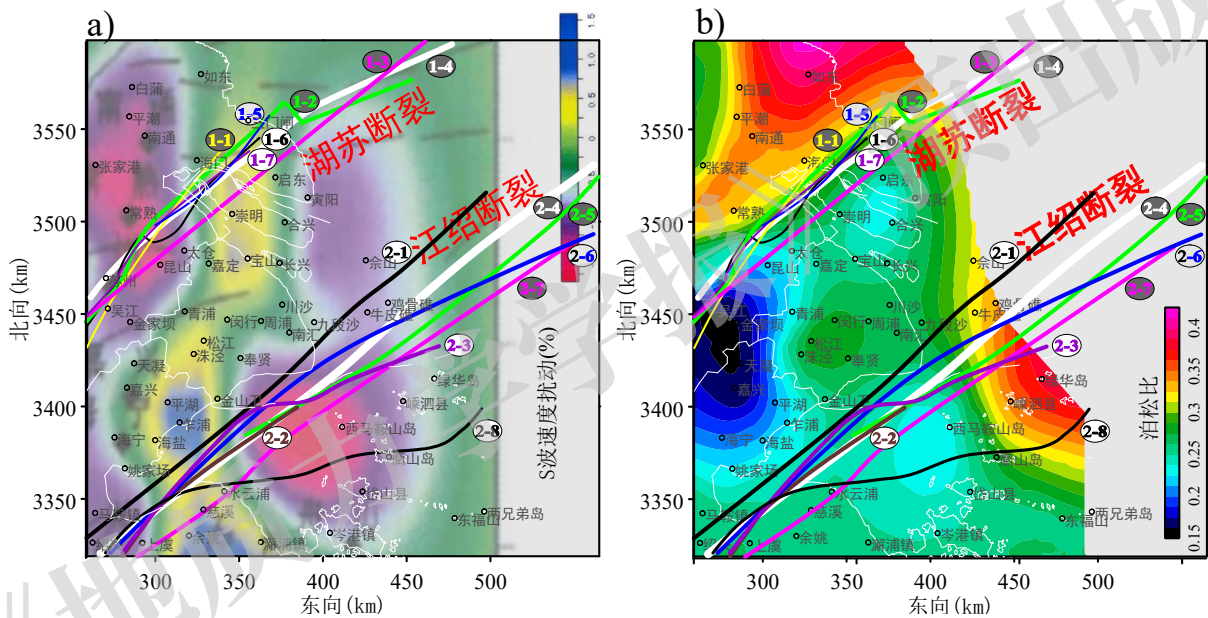
Fig.10 Details in the upper crust along profile HQ-13

(a) Ray path distribution from seismic inversion (blue dashed lines are the inverted low-velocity anomaly zones from Bai (2002)); (b) Upper crustal velocity structure derived from seismic travel-time inversion (values indicate seismic wave velocities in km/s; red and blue dashed lines are high- and low-velocity anomalies, respectively, from Bai (2002)); (c) Density and magnetization anomalies derived from this inversion (white contours indicate magnetic field strengths of 0.1–2.0 A/m).

上海及邻区 2 km 深度 S 波层析成像特征（王小平，2007）与地壳平均泊松比异常（顾勤平等，2022）如

图 11 所示。宏观上湖苏断裂、江绍断裂位于密度异常、磁性异常、速度异常、地壳平均泊松比异常的梯度带、鞍部或错断带，该特征是断裂识别的主要依据。总体而言，以往研究关于湖苏断裂的空间展布推断差异性较小，而关于江绍断裂的空间分布的认识存在较大分歧，具体分析如下：①顾勤平等（2022）中有关江绍断裂的位置（编号 2-1）偏西北，该推测断裂西南侧经过 S 波速度异常中心（图 11b）、其中部经过九段沙高密度异常中心（图 6）。②汪发祥（2016）、王舒畋和李斌（2009）、Zhu et al.（2022）、陈涛等（2023）等有关江绍断裂的位置（编号分别为 2-3、2-5、2-7、2-8）偏东南，穿过了西马鞍山岛西侧低波速异常与地壳平均泊松比异常。其中编号 2-3 断裂穿过长河盆地北侧高密度异常中心以及东双礁高密度异常中心、编号 2-5 断裂经过鸡骨礁东侧高密度异常中心、编号 2-7 断裂经过长河盆地北侧高密度异常中心、编号 2-8 断裂经过长河盆地低密度异常中心，与断裂识别标志存在一定冲突。③尚鲁宁等（2024）有关江绍断裂的位置（编号 2-6）西南段与此次推测结果相近，但北东段向南东转向，陆续穿过鸡骨礁—长江口外高密度异常中心，位于低磁性异常区。

综上所述，以往有关江绍断裂走向的推测，一部分认为其经过波速异常中心或密度异常中心，与断裂识别依据存在一定冲突。此次基于密度异常与磁性异常的梯度带、鞍部或者异常扭曲错断带推测的江绍断裂（编号 2-4）与现有资料更加吻合。



图中不同颜色的线条表示推测的 2 条断裂位置，编号及参考文献见图 4

a—2km 深度 S 波层析成像（据王小平，2007 修改）；b—地壳平均泊松比（据顾勤平等，2022 修改）

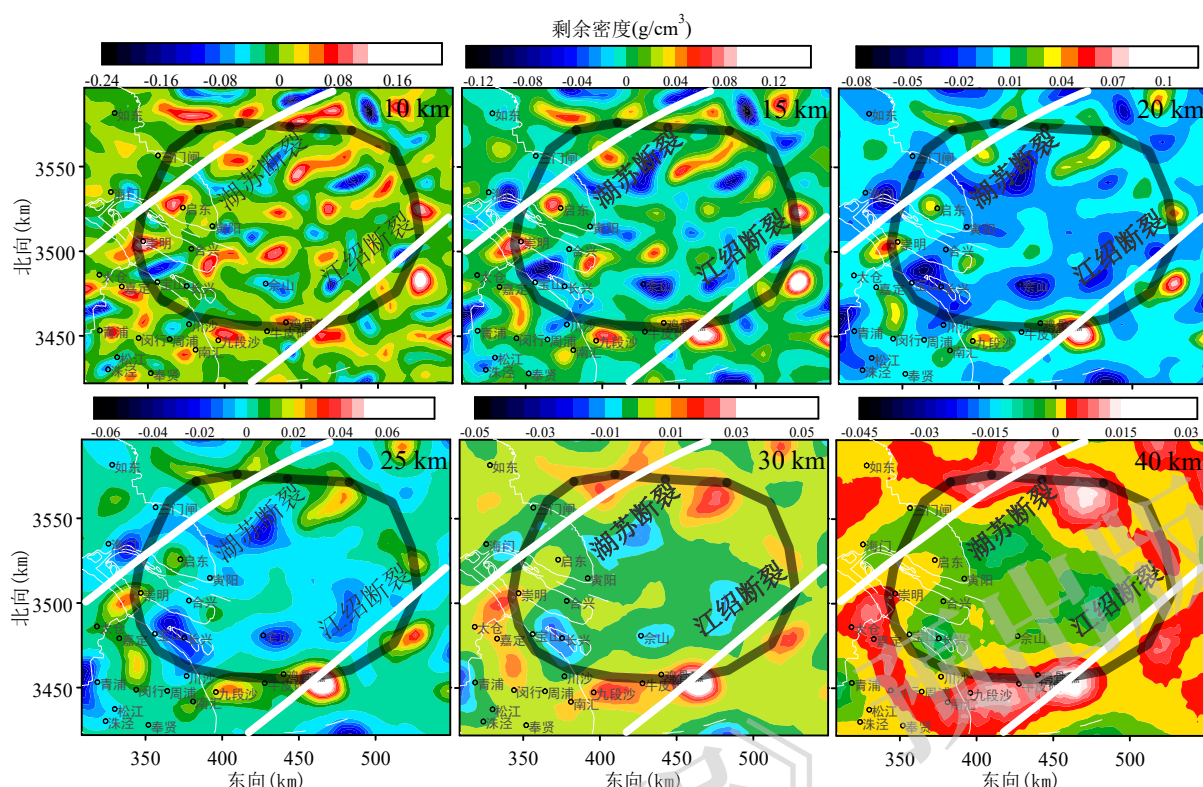
图 11 上海及其相邻地区 S 波层析成像与地壳平均泊松比结果

Fig. 11 S-wave tomography and average crustal Poisson ratio

(a) S-wave velocity at a depth of 2 km from Wang (2007); (b) Crustal average Poisson ratio from Gu et al. (2022).

The colored lines in the figure indicate the inferred locations of two faults, see details in Figure 4.

由长江口不同深度密度异常水平分布图（图 12）可以看出，10 km 深度密度异常分布无明显规律，自 15 km 深度至 40km 深度，显示了较清晰的环形构造，即沿着环形周缘呈现高密度异常，而环形中心区域显示低密度异常，表明该环形构造主要位于中一下地壳，且受湖苏断裂、江绍断裂控制。此次推测的环形构造与远震接收函数得到的崇明以东较低的地壳平均波速比（ <1.70 ）相对应，且地震层析成像获得的 P 波速度扰动在寅阳附近也存在低波速异常（王小平，2007），从而印证了该环形构造的客观性。



图中黑色圆圈表示本文推测的长江口环形构造, 白色线条表示本次推测的湖苏断裂和江绍断裂

图 12 长江口地壳环形构造区不同深度密度异常分布

Fig. 12 Density contrasts at different depths of the ring structure

The black circles indicate the circular structure at the Yangtze River Estuary inferred in this study, and the white lines represent the inferred Husu Fault and Jiangshao Fault.

3 结 论

(1) 基于上海及邻区重磁异常特征, 利用无约束反演构建了地壳三维密度异常与磁化强度异常模型, 结合重磁异常向上延拓与场源边界识别, 指出区内大多数重磁异常不同源但存在显著的伴生关系, 表明沿断裂活动侵入的火成岩以中低密度、中强磁性为主要特征, 为该区重磁异常成因解释指明了方向。

(2) 此次无约束反演获得的地壳三维密度异常、磁化强度异常与地震测深大剖面 HQ-13 线的地壳速度结构相吻合, 同时明确了昆山附近的高波速异常是由昆山隆起高密度物质与甬直凹陷下方的低密度花岗岩共同引起的, 由此表明反演结果的客观性, 可为深部构造解释提供更丰富的资料。

(3) 湖苏断裂、江绍断裂主要位于密度与磁性异常的梯度带或错断带位置, 深度切片显示断裂两侧存在显著的密度与磁性差异, 影响深度达 20 km。

(4) 上海及其相邻地区内湖苏断裂自苏州经海门、三门闸一线呈北东向延伸入海, 总体倾向南东向; 江绍断裂自绍兴进入杭州湾后呈北东向经鸡骨礁密度凹陷区进入长江口外海, 总体倾向北西向。基于地壳密度异常, 此次识别出长江口环形构造。该环形构造挟持于湖苏断裂与江绍断裂之间, 反映出中一下地壳凹陷的宏观特征, 为该区深部结构研究提供了新线索。

作者贡献声明: 胡祥云负责全文构思与论文修改; 谢建磊负责数据收集、整理及资料解释; 张恒磊负责数据处理与反演解释、论文撰写。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: HU Xiangyun was responsible for conceptualizing the paper and revision; XIE Jianlei performed data collection, organization, and interpretation; ZHANG Henglei carried out data processing, interpretation, and writing. All authors have read

and approved the submission and publication of this manuscript.

利益冲突声明： 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

参考文献（References）：

- BAI Z M, 2002. Deep seismic sounding tomography: research and applications[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Seismological Bureau. (in Chinese with English abstract)
- CHEN T, SONG F M, YU G Q, et al., 2023. Quaternary activity along the Guangde-Hangzhou section of the Xiaofeng-Sanmenwan fault[J]. *Earthquake Research in China*, 39(2): 346-355. (in Chinese with English abstract)
- DAI M X, XU R R, ZHAO F Y, et al., 2025. Analysis of crustal structure and strong earth-quake activity of the Iranian plateau based on gravity inversion in spherical coordinate system[J]. *Seismology and Geology*, 47(5): 1326-1342. (in Chinese with English abstract)
- FENG C, SONG X Q, WANG R T, et al., 2024. S-wave velocity structure in Shanghai and adjacent areas based on ambient noise tomography[J]. *Seismology and Geology*, 46(6): 1374-1390. (in Chinese with English abstract)
- GENG M X, YANG Q J, KASMI C, et al., 2024. Unveiling magmatic structures and connectivity beneath the lunar Oceanus Procellarum region from GRAIL gravity data[J]. *Nature Communications*, 15(1): 10296.
- GU P T, 1993. More discussions on geological structure of Shanghai area[J]. *Shanghai Geology*(3): 1-10, 36. (in Chinese with English abstract)
- GU Q P, LI D H, DING Z F, et al., 2022. Crustal structure characteristics beneath the Shandong-Jiangsu-Anhui segment of the Tan-Lu fault zone and its adjacent regions using receiver functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(9): 3280-3296. (in Chinese with English abstract)
- GUAN Z N, 2005. *Geomagnetic field and magnetic exploration*[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- HUANG Z Q, WU Z C, FANG Y X, et al., 2025. Crustal structure of Philippine Sea Plate: insights from gravity inversions constrained by deep seismic[J]. *Earth Science*, 50(1): 234-245. (in Chinese with English abstract)
- HUO E J, LIU C S, ZHANG Z Q, et al., 2004. Study on buried faults and their activity in Shanghai[M]. Beijing: Earthquake Press. (in Chinese)
- LI Q T, MAO Z Y, 1986. Investigation for stretch of Jiangshan-Shaoxing fault zone in Hangzhou Bay[J]. *Scientia Geologica Sinica*(3): 211-216. (in Chinese with English abstract)
- LI W K, YANG M, FENG W, et al., 2025. Implication of crustal density structure beneath the Wudalianchi Volcanic Field from 3D imaging of dense gravimetric data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 68(12): 4702-4713. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, TAN P C, LIU S W, 2026. Thick crust at Earth's slowest spreading ridge: 3D gravity insights from Eurasian Basin, Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 53(4): e2025GL119292.
- LIU D M, GUO L H, HAN M, 2026. Crustal three-dimensional architecture of the Yarlung Zangbo magmatic belt: insights from magnetic inversion[J]. *Science China Earth Sciences*, 69(4): 1539-1552.
- LIU J D, LI Q H, ZHANG Y S, et al., 2009. Hypocenter relocation in central and southern Jiangsu Province and adjacent areas, China and its application to fault research[J]. *Progress in Geophysics*, 24(1): 58-66. (in Chinese with English abstract)
- SHANG L N, PAN J, CAO R, et al., 2024. Structural characteristics of the Binhai Fault Zone in Jiangsu offshore—implications from gravity and magnetic data[J]. *East China Geology*, 45(1): 101-114. (in Chinese with English abstract)
- SHE Y W, FU G Y, LIU T, et al., 2026. Gravity anomalies and crustal density structure beneath the Xiong'an region by merging ground observation and satellite model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 69(9): 3871-3881. (in Chinese with English abstract)
- WANG F X, 2016. The research of geothermal resources assessment and development on the sedimentary basin in Zhejiang Province[D]. Nanjing: Nanjing University. (in Chinese with English abstract)
- WANG S T, LI B, 2009. Quaternary faults and neotectonic movement in the Yangtze River estuary[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(1): 53-58. (in Chinese with English abstract)

- WANG X P, 2007. The study of 3D velocity structure and anisotropy under Shanghai and its neighboring area[D]. Shanghai: Tongji University. (in Chinese with English abstract)
- XIE J L, 2018. Seismic activity characteristics and seismotectonic province division of Shanghai and nearby regions[J]. Shanghai Land & Resources, 39(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- YANG W C, HE L J, JIANG J S, et al., 2022. A synthetic study of the crust structures of Zhejiang Province[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 95-103. (in Chinese with English abstract)
- YAO B H, ZHANG Z Q, WANG J L, et al., 2007. Prospecting and research on fine crustal structure by using multi-geophysics survey methods in Shanghai region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 50(2): 482-491. (in Chinese with English abstract)
- YU H Y, WEN Y L, GAO L N, et al., 2021. Crustal structure of Yangtze River Delta using tomoDD and its implication for seismicity[J]. Progress in Geophysics, 36(1): 105-111. (in Chinese with English abstract)
- YU P, WU J S, WANG J L, et al., 2008. Using long period magnetotelluric profile of Fengcheng of Shanghai—Huzhou of Zhejiang Province to study deep electrical structure[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(2): 503-510. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H L, RAVAT D, MARANGONI Y R, et al., 2014. NAV-Edge: edge detection of potential-field sources using normalized anisotropy variance[J]. Geophysics, 79(3): J43-J53.
- ZHANG H L, RAVAT D, LOWRY A R, 2020. Crustal composition and Moho variations of the central and eastern United States: improving resolution and geologic interpretation of EarthScope USArray seismic images using gravity[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(3): e2019JB018537.
- ZHANG S W, ZHANG S X, TANG R Y, et al., 1988. Interpretation of the Fuliji-Fengxian DSS profile in Xiayangzi region[J]. Acta Geophysica Sinica, 31(6): 637-648. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y B, FAN X P, FU W, et al., 2025. Joint detection of upper breakpoint location of Kunshan—Jiading Fault using active-passive source method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 45(5): 1301-1310. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO B R, LI H P, ZHANG H L, 2025. The influence of model space subdivision on three-dimensional magnetic anomaly inversion[J]. Pure and Applied Geophysics, 182(4): 1513-1524.
- ZHAO C J, ZHANG L L, HUANG Z W, et al., 2026a. Revealing deep-rooted pre-Paleozoic fault systems in the lower Yangtze region: insights from 3D magnetic inversion and gravity inversion and integrated geophysical interpretation[J]. Tectonophysics, 918: 231001.
- ZHAO F Y, ZHAN C R, PEI J L, et al., 2026b. Spherical gravity inversion reveals crustal structure and microplate tectonics in the Caribbean Sea[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 14(1): 109.
- ZHU X S, WANG L L, ZHOU X W, 2022. Structural features of the Jiangshao Fault Zone inferred from aeromagnetic data for South China and the East China Sea[J]. Tectonophysics, 826: 229252.
- ZHU Z Z, XU G S, 1990. Preliminary approach to the relationship between the characteristics of gravity, magnetic fields and fault structure in Shanghai area[J]. Shanghai Geology(2): 42-50. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白志明, 2002. 深地震测深剖面的层析成像研究及其应用[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 陈涛, 宋方敏, 余刚群, 等, 2023. 孝丰—三门湾断裂广德—杭州段第四纪活动性研究[J]. 中国地震, 39(2): 346-355.
- 戴梦雪, 徐荣荣, 赵斐宇, 等, 2025. 基于球坐标系重力反演的伊朗高原地壳结构与强震活动分析[J]. 地震地质, 47(5): 1326-1342.
- 冯策, 宋秀青, 王仁涛, 等, 2024. 基于背景噪声层析成像反演上海及邻区S波速度结构[J]. 地震地质, 46(6): 1374-1390.
- 顾澎湃, 1993. 有关上海地区地质构造的几点新认识[J]. 上海国土资源(3): 1-10, 36.
- 顾勤平, 李大虎, 丁志峰, 等, 2022. 利用接收函数研究郯庐断裂带鲁苏皖段及邻区地壳结构特征[J]. 地球物理学报, 65(9): 3280-3296.
- 管志宁, 2005. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京: 地质出版社.
- 黄子强, 吴招才, 方银霞, 等, 2025. 菲律宾海板块地壳结构特征: 基于地震约束的重力反演[J]. 地球科学, 50(1): 234-245.
- 火恩杰, 刘昌森, 章振铨, 等, 2004. 上海市隐伏断裂及其活动性研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 李起彤, 毛正毅, 1986. 江山-绍兴断裂带在杭州湾延伸的探讨[J]. 地质科学(3): 211-216.
- 李为凯, 杨萌, 冯伟, 等, 2025. 基于密集重力数据的五大连池火山区地壳密度结构三维成像研究[J]. 地球物理学报, 68(12): 4702-4713.
- 刘定美, 郭良辉, 韩梅, 2026. 雅鲁藏布江岩带地壳三维架构: 来自磁力反演的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 56(4): 1576-1589.
- 刘建达, 李清河, 张元生, 等, 2009. 江苏中、南部及邻区地震重新定位及在断层研究中的应用[J]. 地球物理学进展, 24(1): 58-66.

尚鲁宁, 潘军, 曹瑞, 等, 2024. 基于重磁数据研究江苏岸外滨海断裂带及邻区构造特征[J]. 华东地质, 45 (1): 101-114.

余雅文, 付广裕, 刘泰, 等, 2026. 融合地面观测和卫星模型的雄安地区重力异常和地壳密度结构研究[J]. 地球物理学报, 69 (9): 3871-3881.

汪发祥, 2016. 浙江省沉积盆地地热资源评价及开发利用研究[D]. 南京: 南京大学.

王舒畋, 李斌, 2009. 长江口海域的第四纪断层与新构造活动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29 (1): 53-58.

王小平, 2007. 上海及其邻近地区地下三维速度结构及各向异性的研究[D]. 上海: 同济大学.

谢建磊, 2018. 上海及邻区地震活动特征及地震构造区划[J]. 上海国土资源, 39 (4): 1-6.

杨文采, 何良军, 江金生, 等, 2022. 浙江省地壳构造综合研究[J]. 地质学报, 96 (1): 95-103.

姚保华, 章振铨, 王家林, 等, 2007. 上海地区地壳精细结构的综合地球物理探测研究[J]. 地球物理学报, 50 (2): 482-491.

于海英, 温燕林, 高丽娜, 等, 2021. 上海及周边地区地壳精细速度结构体波双差成像[J]. 地球物理学进展, 36 (1): 105-111.

于鹏, 吴健生, 王家林, 等, 2008. 上海奉城—浙江湖州长周期 MT 剖面揭示的深部电性结构[J]. 地球物理学报, 51 (2): 503-510.

张四维, 张锁喜, 唐荣余, 等, 1988. 下扬子地区符离集—奉贤地震测深资料解释[J]. 地球物理学报, 31 (6): 637-648.

张颐彪, 范小平, 符伟, 等, 2025. 利用主-被动源法联合探测昆山—嘉定断裂上断点位置[J]. 防灾减灾工程学报, 45 (5): 1301-1310.

朱子沾, 徐关生, 1990. 上海地区重磁场特征与断裂构造关系初探[J]. 上海地质 (2): 42-50.

获奖者简历:



胡祥云, 中国地质大学(武汉)二级教授、博士生导师, 国务院特殊津贴获得者, 国家重点研发计划项目首席科学家, 国务院学位委员会第九届学科评议组成员, 中国地球物理学会常务理事, *Geophysics*、*GSA Bulletin* 副主编。2025 年荣获李四光地质科学奖科研奖。长期从事电磁探测与深部资源勘探研究, 主持国家重点研发计划、国家自然科学基金重点、部委揭榜挂帅等项目 20 余项。研究方向涵盖地球物理弱信号提取、壳幔结构探测、地球物理设备研发等。在深部资源勘探中应用 CSAMT 和 AMT 技术发现多金属矿体与天然气水合物靶区, 构建华南地块东部岩石圈三维地质模型, 主导研制的高精度地球物理场观测设备突破零点漂移抑制等技术瓶颈。出版专著 7 部, 在 *Geophysical Research Letters*、*Geophysics*、《地球物理学报》等期刊发表论文 300 余篇。获湖北省自然科学奖一等奖等省部级奖励, 2019 年入选自然资源部高层次科技创新人才梯队。