



东海古地理位置变化与迁移——古地磁学约束

徐铭辰, 杨风丽, 张 更, 唐贤君, 户盼盼, 董若雯, 庄 圆

Changes and migrations in the paleoposition of the East China Sea: Evidence from paleomagnetic records

XU Mingchen, YANG Fengli, ZHANG Geng, TANG Xianjun, HU Panpan, DONG Ruowen, and ZHUANG Yuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2025053003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东海盆地丽水凹陷古新世构造迁移及其对烃源岩发育的影响

Tectonic migration and its impact on the development of source rocks in the Paleogene Lishui Sag, East China Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2025, 45(2): 146–157

南黄海SYS90-1A孔第四纪沉积物磁性地层学研究

Magnetostratigraphy of Quaternary sediments from borehole SYS90-1A in the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 97–109

珠江口盆地白云凹陷始新世—中新世沉积物物源研究

Provenance of the Eocene–Miocene sediments in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 19–28

东海陆架盆地N气田花港组储层特征及分类评价

Characteristics and classification of the Paleogene reservoirs in Huagang Formation of Gas Field N, East China Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 166–172

南海北部陆架早—中中新世古珠江河道发育特征及汇流冲刷模式

Seismic sedimentary characteristics of the Ancient Pearl River system and its depositional model of confluence scours, northern shelf of the South China Sea in Early–Mid Miocene

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 31–44

晚上新世以来菲律宾海盆XT4孔黏土矿物特征及其古环境意义

Evolution of clay minerals assemblages since Late Pliocene and its paleoenvironmental implications: Evidence from Core XT4 of the Philippine Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 42–51



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

徐铭辰, 杨风丽, 张更, 等. 东海古地理位置变化与迁移——古地磁学约束[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(4): 130-140.

XU Mingchen, YANG Fengli, ZHANG Geng, et al. Changes and migrations in the paleoposition of the East China Sea: Evidence from paleomagnetic records[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(4): 130-140.

东海古地理位置变化与迁移——古地磁学约束

徐铭辰^{1,2}, 杨风丽^{1,2}, 张更², 唐贤君³, 户盼盼¹, 董若雯², 庄圆²

1. 同济大学海洋地质全国重点实验室, 上海 200092

2. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

3. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

摘要: 东海盆地作为西太平洋汇聚大陆边缘盆地体系的重要组成部分,其起源与运动过程存在诸多争议,目前就存在着是“华南地块的一部分”还是“外来微陆块”两种不同认识。为明确东海盆地早白垩世以来的古位置变化,本文首次对东海盆地内9口钻井的白垩系—始新统岩芯进行了系统采样和古地磁实验测试研究,分析结果表明,东海盆地在早白垩世—中始新世时期一直处于15°N至30°N之间的低纬度位置,且其方位与现代方位基本一致,与华南地块之间表现出密切的古地理位置关系和构造亲缘性。对东海与华南的古位置对比分析表明,自早白垩世早期(约134 Ma)至中始新世(约40 Ma)期间,东海始终位于华南的东南位置,二者经历了纬度差持续缩小、位置逐渐靠近的三阶段过程:①从早白垩世早期至早古新世早期(约134~65 Ma),东海与华南之间的纬度差从9.0°缓慢降至6.2°;②从早古新世早期到中古新世末(约65~40 Ma),二者之间的纬度差从6.2°快速降至1.2°;③从中古新世末到中始新世(约40~20 Ma),二者之间的纬度差为1.2°~2.0°,东海与华南之间基本形成了现今空间格局,开始一体化同步运动。本研究确认了东海与华南地块之间早白垩世以来的构造亲缘性,对于东海盆地的构造演化过程研究和油气资源潜力评价具有重要意义。

关键词: 古地磁学; 古地理位置; 早白垩世—中始新世; 华南地块; 东海盆地

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2025053003

Changes and migrations in the paleoposition of the East China Sea: Evidence from paleomagnetic records

XU Mingchen^{1,2}, YANG Fengli^{1,2}, ZHANG Geng², TANG Xianjun³, HU Panpan¹, DONG Ruowen², ZHUANG Yuan²

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. Shanghai Branch Company of China National Offshore Oil Corporation (China), Shanghai 200335, China

Abstract: As an important part of the western Pacific convergent marginal basin system, the origin and movement history of the East China Sea Basin is still controversial, especially the paleopositional relationship between the East China Sea and the South China Block, which remains unclear. To clarify the paleolocation changes of the East China Sea Basin since the Early Cretaceous, we conducted a systematic paleomagnetic study using Cretaceous-Eocene samples from nine boreholes in the East China Sea Basin. Results show that the East China Sea Basin was located at a low latitude between 15°N and 30°N during the Early Cretaceous to Middle Eocene epoches, and its paleo-orientation was largely the same to the modern one, showing a close paleogeographical relationship and tectonic affinity with the South China Block. The comparative analysis of the paleoposition of the East China Sea and South China Block showed that the East China Sea had always been located in the southeast of the South China Block from the Early Cretaceous (~134 Ma) to the Middle Eocene (~40 Ma). During this period, the latitudinal difference between the two had continued to narrow down, and their positions became closer after experiencing three stages of change: (1) From the Early Cretaceous to the Early Paleocene (~134 - ~65 Ma), the latitudinal difference between the East China Sea and South China Block decreased slowly from 9.0° to 6.2°; (2) from the Early Paleocene to the end of the Middle Paleocene (~65 - ~40 Ma), the latitudinal difference between the two decreased rapidly from 6.2° to 1.2°; (3) from the end of the Middle Paleocene to the Middle Eocene (~40 - ~20 Ma), the latitudinal difference ranged from 1.2° to 2.0°, and a spatial pattern similar to the modern one was formed between the East China Sea and South China Block, with synchronous movement. This study confirmed the tectonic affinity between the East China Sea and the South China Block

资助项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目“西太平洋地球系统多圈层相互作用”(92158207)

作者简介: 徐铭辰(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事古地磁与构造动力学研究, E-mail: xumch@tongji.edu.cn

通讯作者: 杨风丽(1964—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事构造与盆地分析研究, E-mail: yangfl@tongji.edu.cn

收稿日期: 2025-05-30; 改回日期: 2025-07-29. 周立君编辑

since the Early Cretaceous, holding significant implications for research on the tectonic evolution of the East China Sea Basin and the evaluation of its hydrocarbon resource potential.

Key words: paleomagnetism; paleogeographic location; Early Cretaceous-Middle Eocene; South China Block; East China Sea Basin

东海盆地作为西太平洋大陆边缘盆地体系的重要组成部分,地处华南地块与菲律宾海板块之间的交汇地带(图 1)。作为东亚陆缘构造演化的关键载体,其不仅记录了大陆边缘俯冲作用和板块与微陆块会聚活动的重要信息^[1-3],而且蕴含着丰富的油气资源潜力^[4-6]。然而,东海盆地的起源与构造亲缘问题一直没有得到明确解决^[7-8]。虽然在过去的几十年里,前人利用地质、地球物理、地球化学资料和信息等的间接证据,对此做了一定的分析与推测^[9-13],但到目前为止,仍存在着两种不同观点和认识:一种认为东海是华南地块的向海延伸部分,自中生代以来与华南共同经历裂陷、伸展与弧后扩张过程^[14-16];另一种则认为东海为古太平洋板块搬运而来的外来微陆块,在晚中生代通过碰撞拼贴至华南陆缘^[8,13,17]。显然这些不同观点和争议直接影响了对东亚陆缘构造演化模式的整体认识,也制约了对东海盆地性质的准确判断。

古地磁学作为确定板块或陆块古地理位置的有效方法和途径^[18-20],在中生代华南-华北拼合关系^[21-22]、新生代印度-欧亚大陆碰撞事件^[23-24]、菲律宾板块的旋转与漂移过程^[25-26]等板块构造位置关系

研究中发挥了重要的约束作用,然而,在东海微陆块或盆地内的相关研究却尚未开展。因此,本文通过对东海盆地钻井岩芯进行的系统古地磁采样和测试分析,并结合与华南地块前人古地磁数据的对比分析,来揭示东海早白垩世以来的古地理位置变化,进而厘清东海盆地的起源与构造亲缘问题。

1 地质背景与古地磁样品采集

1.1 东海盆地基本特征

位于华南地块与菲律宾海板块之间的东海盆地(图 1),南部紧邻台湾岛,以浙闽隆起带为界与华南地块相邻,东部以琉球岛弧与菲律宾海相隔,地处西太平洋汇聚大陆边缘,是西太平洋沟弧盆体系的典型发育地区^[27-29]。东海盆地是一个中-新生代复合盆地^[30-31],主要由西侧宽缓的东海陆架盆地、中间的钓鱼岛隆起和东侧的冲绳海槽这 3 个构造单元所组成^[12, 32]。其中东海陆架盆地覆盖范围最广,从西到东可分为西部坳陷带、中部低隆起和东部坳陷带 3 个次级构造单元以及内部所包含的多个次

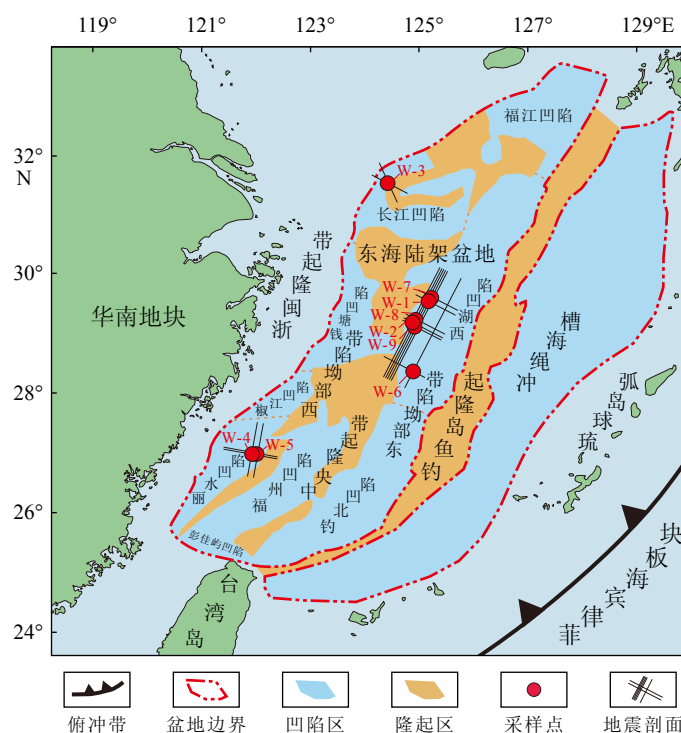


图 1 东海盆地区域构造位置图

Fig.1 Tectonic location of the East China Sea Basin

级凹陷所组成^[9, 33-34](图 1)。

经过四十余年的工业界油气勘探,东海盆地目前已有约 100 多个钻井点位,钻遇层系涵盖了盆地基底前震旦系、中生界侏罗系和白垩系、新生界古新统、始新统、中新统和新近系(图 2)。其中,盆地基底主要为前震旦系变质岩,中生界主要以陆相碎屑岩和火山岩为主,新生界主要为中—细砂岩、泥岩沉积^[35]。平面上,侏罗系主要分布于西部拗陷带的福州凹陷内,白垩系主要分布于西部拗陷带的大部分和东部拗陷带的西湖凹陷西侧及钓北凹陷^[36],新生界古新统主要分布于西部拗陷带的丽水—椒江凹陷、福州凹陷、钱塘凹陷和长江凹陷中,始新统一中新统主要分布于东部拗陷带的西湖凹陷和钓北凹陷中^[7, 33, 37-38],新近系及更晚沉积物的最大沉积厚度则主要位于最东部的冲绳海槽中^[39]。

1.2 东海盆地钻井岩芯古地磁样品采集

1.2.1 取芯钻井位置选择

由于钻井岩芯为非原位样品,为保证钻井岩芯古地磁采样的可靠性、避免地层倾斜对磁倾角测量带来的影响,根据定向性、连续性、代表性的古地磁采样原则^[40-41],在采样钻井位置的选择上,除了尽量选择同一地质单元内地层产状平缓、地层年代明确的钻井外,还要求采样钻井符合钻探方向垂直于水平面、井内地层界面发育良好、过井十字地震剖面测量出的地层产状近似水平等条件,例如图 3 展示的过 W-1 采样井的十字地震剖面,其地层产状具有近似水平特征。

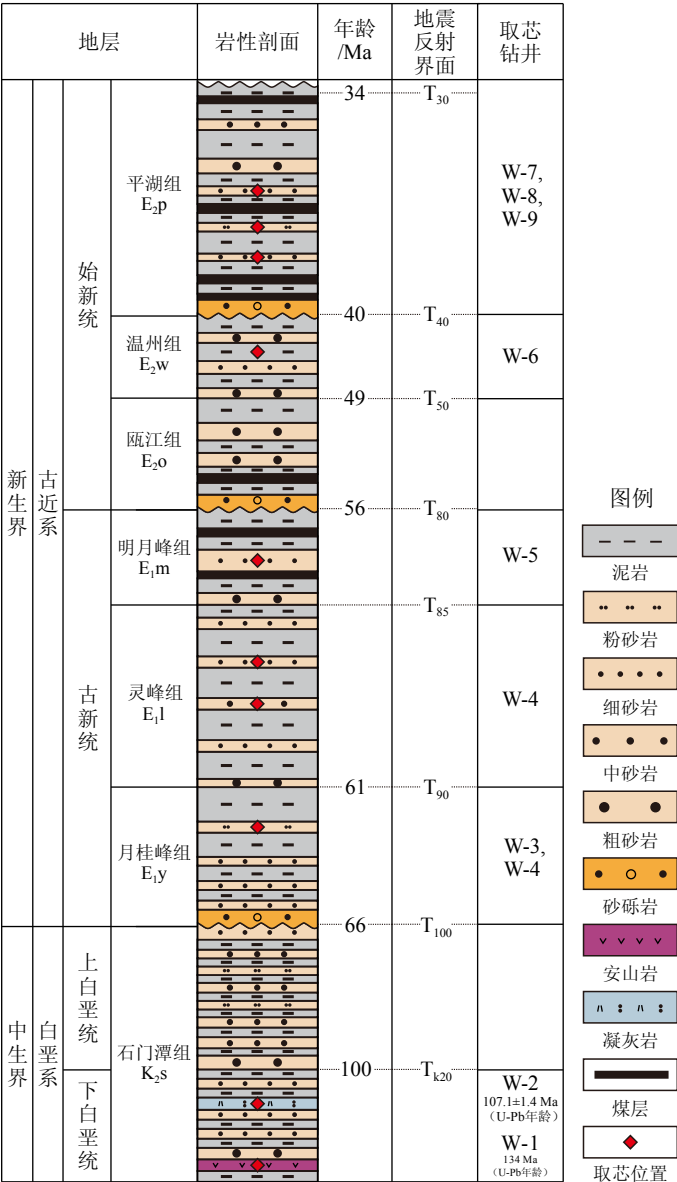


图 2 东海盆地地层柱状图及钻井采样层位

Fig.2 Stratigraphic column of the East China Sea Basin and the sampling positions of boreholes

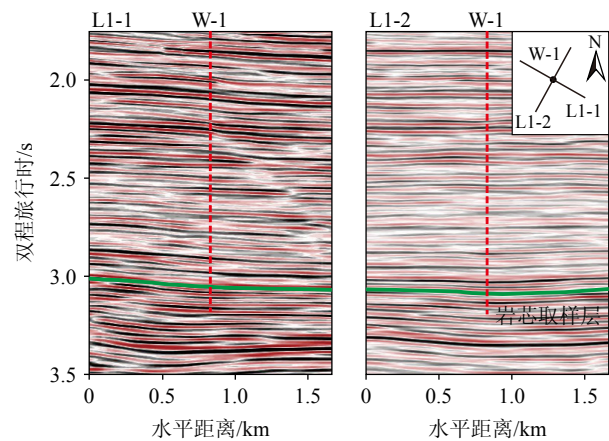


图 3 过 W-1 井岩芯取样层的地震剖面
井位置见图 1。

Fig.3 Seismic profiles of the samples in W-1 borehole
Drilling site see Fig.1

据此原则,我们在东海盆地内共选取了 9 口从白垩系到始新统不同层系的钻井岩芯,具备古地磁采样的要求。平面上,它们分别位于西部拗陷中的丽水凹陷、长江凹陷和东部拗陷中的西湖凹陷(图 1-2)。其中,丽水凹陷 2 口钻井,长江凹陷 1 口钻井,西湖凹陷 6 口钻井(图 1、表 1)。因侏罗系没有符合条件的古地磁样品,故没有进行采集样品。

1.2.2 钻井岩芯古地磁样品采集

遵循古地磁采样的基本原则^[40,43],在钻井采样岩芯选择上,我们尽量选择岩性均一、岩石裂缝稀少的位置;同时对于凝灰岩样品,尽量选取火山灰基质,避开大块角砾或岩屑。在采样操作上,使用台式钻机,在钻井岩芯柱上钻取直径 2.5 cm 的圆柱体岩芯,并保证钻头方向垂直于岩芯柱(图 3)。本次岩芯的采样间隔约为 1 m,岩性包括凝灰岩、安山岩、砂岩 3 种,其具体层位与年代见表 1。

从 9 口钻井中共采集了 101 块顶底定向的古地磁样品。其中,从西湖凹陷 6 口钻井中采得 26 个白

垩系凝灰岩、安山岩样品和 28 个始新统砂岩样品,从丽水凹陷 2 口钻井中采得 35 个古新统砂岩样品,从长江凹陷 1 口钻井中采得 12 个古新统砂岩样品(表 1)。

2 古地磁实验测试分析

2.1 实验方法

将样品预处理切割为直径 2.5 cm、高度 2.2 cm 的实验室标准样,在同济大学海洋地质全国重点实验室分别开展了磁化率各向异性测量、热磁分析、渐进式热退磁等实验测试和分析。

其中,每个采样层代表性样品的磁化率各向异性(AMS)通过 MFK1-FA 卡帕桥磁化率仪测量,热磁分析通过与卡帕桥仪器耦合的 CS-3 设备进行,分析过程中样品被加热至 700 ℃,之后冷却至室温。天然剩磁(NRM)的渐进热退磁实验在残余磁场小于 200 nT 的磁屏蔽室内进行,使用内部剩余磁场小于 10 nT 的 ASC Scientific TD-48SC 单腔热退磁仪进行了热磁清洗工作,使用 JR-6A 旋转磁力仪测量了每一次退磁后样品的剩余磁化强度。热退磁的最高温度为 650 ℃,升温梯度在 500 ℃ 以下时为 25~50 ℃,500 ℃ 以上时为 10~20 ℃。为了评估退磁结果,使用赤平投影 Zijdeveld 正交图^[44]解析了样品的磁分量结构,用主成分分析识别等效分量方向^[45]。

2.2 岩石磁学结果

2.2.1 磁化率各向异性

磁化率各向异性(AMS)测量结果表明,安山岩样品(采样点 S1)质量磁化率值为 $10.1\times10^{-6}\sim14.4\times10^{-6}\text{ m}^3/\text{kg}$,平均质量磁化率(χ_m)为 $12.7\times10^{-6}\text{ m}^3/\text{kg}$,

表 1 东海盆地钻井古地磁样品采集

Table 1 Specifications of the paleomagnetic samples collected from the East China Sea Basin

采样点编号	采样钻井	地层	年代/Ma	岩性	样品数量
S1	W-1	白垩系石门潭组	134	安山岩	13
S2	W-2	白垩系石门潭组	108.5~105.7	凝灰岩	13
S3	W-3	古新统美人峰组	66~61	砂岩	12
S4	W-4	古新统月桂峰组	66~61	砂岩	13
S5	W-4, W-5	古新统灵峰组-明月峰组	61~56	砂岩	22
S6	W-6, W-7, W-8, W-9	始新统宝石组-平湖组	49~34	砂岩	28

注: 地层年代据文献^[42]。

校正后的各向异性度(P_j)和形状参数(T)的取值范围分别为 1.068 ~ 1.121 和 0.238 ~ 0.956; 凝灰岩样品(采样点 S2)的质量磁化率值为 $11.2 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$, χ_m 为 $83.4 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$, 校正后的 P_j 和 T 的取值范围分别为 1.009 ~ 1.096 和 -0.377 ~ 0.971(图 4a-b)。砂岩样品(采样点 S3-S6)的质量磁化率值为 $9.2 \times 10^{-9} \sim 101.0 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$, χ_m 为 $51.2 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$, 校正后的 P_j 和 T 的取值范围分别为 1.004 ~ 1.123 和 -0.921 ~ 0.897, 其各向异性平均强度(P_{AMS})为 1.0184, 低于沉积岩倾角浅化的 1.04 阈值^[46]。鉴于上述样品的各向异性程度较低, 且 P_j 和 T 之间无明显相关性, 我们认为本研究取得的样品不太可能受到变形的显著影响。

2.2.2 磁化率随温度变化曲线

东海代表性样品的热磁曲线表现出两种类型的变化行为(图 4c)。其中:

类型(i)出现于安山岩样品中。加热曲线在

300 °C 之前缓慢升高, 之后磁化率在 300 ~ 500 °C 保持平稳不变, 随后在 500 ~ 580 °C 大幅下降, 接近或略低于磁铁矿的居里温度, 呈现出钛磁铁矿或磁铁矿特征。冷却曲线在 400 ~ 540 °C 之间快速升高, 但强度略低于加热曲线, 可能是样品中少量亚稳定、强磁性的磁赤铁矿受热转化为弱磁性的赤铁矿所致^[48]。

类型(ii)主要出现于凝灰岩和砂岩样品中。加热过程中, 磁化率在 400 °C 之前缓慢下降, 之后在 400 ~ 580 °C 快速升高, 这一方面可能是由于加热导致钛磁铁矿或黏土矿物等转化成磁铁矿, 另一方面是由于磁铁矿接近解阻温度时磁化率的大幅提升^[49]; 加热至 580 ~ 600 °C 时磁化率大幅下降, 标志着大量磁铁矿的存在; 之后在 600 ~ 700 °C 磁化率保持较低水平, 并未降至 0, 表明样品中存在少量赤铁矿。冷却曲线在 500 ~ 600 °C 大幅升高, 磁化强度高于加热曲线, 这可能反映了额外磁铁矿的形成。

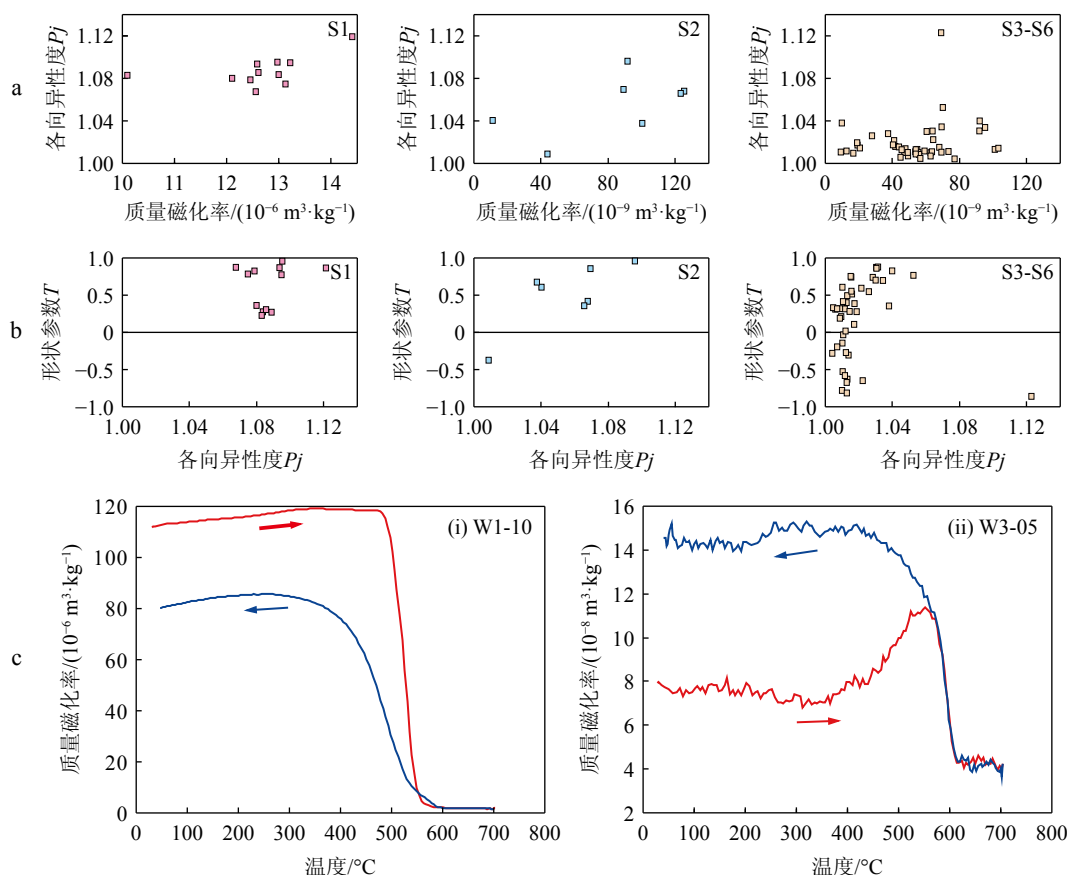


图 4 东海样品岩石磁学分析结果 (Flinn 图^[47]与热磁曲线)

a: 样品质量磁化率(χ)与磁各向异性程度(P_j)变化图, b: 磁各向异性程度(P_j)与各向异性参数(T)变化图, c: 质量磁化率随温度变化曲线。红色曲线代表加热过程, 蓝色曲线代表冷却过程。

Fig.4 Rock magnetism analysis results (the Flinn diagrams^[47] and thermomagnetic behavior) of the samples from the East China Sea

a: Plot of mass magnetic susceptibility (χ) vs. degree of magnetic anisotropy (P_j), b: Plot of degree of magnetic anisotropy (P_j) vs. anisotropy parameter (T), c: Thermomagnetic analysis plots (mass susceptibility vs. temperature). Red curves represent the heating process and blue curves represent the cooling process.

上述热磁特性表明, 安山岩样品的载磁矿物主要为(钛)磁铁矿, 凝灰岩和砂岩样品以磁铁矿和赤铁矿为主要载磁矿物, 均可以携带稳定的磁性记录。

2.3 样品退磁分析结果

系统热退磁结果表明, 除热退磁初始阶段

200 °C 以下的粘滞剩磁外, 东海样品主要包含两组剩磁组分: 低温组分通常在热退磁温度 200~400 °C 被逐步退去; 高温组分的退磁曲线在矢量图原点处呈线性衰减, 可观察到正、反两种极性, 表示稳定的特征剩磁(ChRM), 其解阻温度一般为 500~580 °C, 部分样品的剩磁组分在 400~500 °C 退去(图 5a),

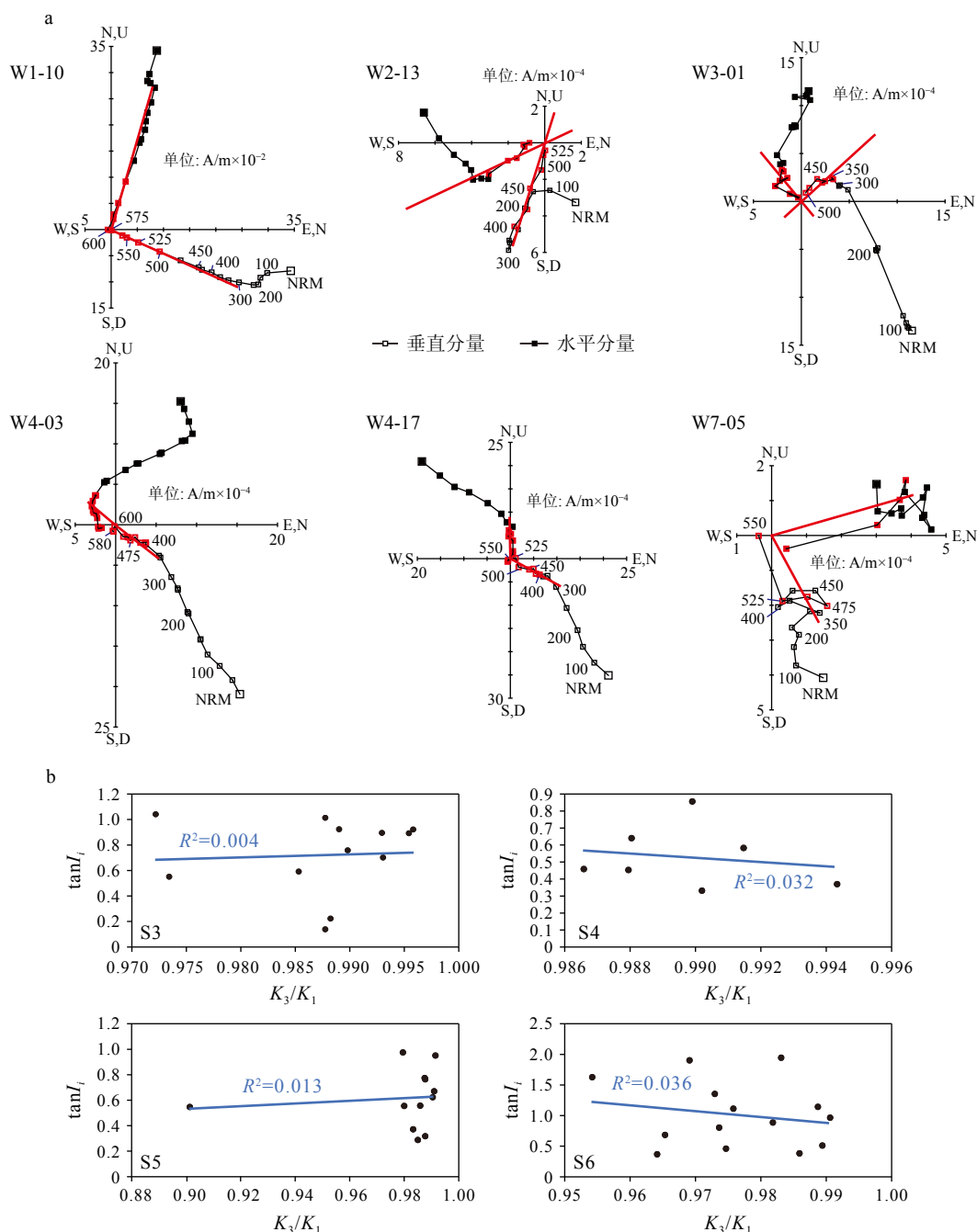


图 5 东海样品热退磁表现

a: 东海代表性样品的逐步热退磁结果(以地理坐标表示), 红色实线表示主成分分析拟合得到的特征剩磁分量; b: $\tan I$ 和 K_3/K_1 的关系图, 显示二者之间无明显相关性。

Fig.5 Examples of typical demagnetization behaviors of the samples from the East China Sea

a: The Zijderveld plots (in geographic coordinate) of setwise thermal field demagnetization of typical samples. Red solid lines indicate the characteristic remanent magnetization (ChRM) component; b: Plot of $\tan I$ vs. K_3/K_1 , showing no significant correlation between them.

指示其主要载磁矿物为(钛)磁铁矿。

采用最大角偏差(MAD)小于 15°的主成分分析法确定了每个样品的特征剩磁(ChRM)倾角 I_i 。通过对每个样品的特征剩磁(ChRM)倾角 I_i 的正切值 $\tan I_i$ 和对应的各向异性平均强度倒数(K_3/K_1)的相关性分析,发现二者之间未出现倾角显著变浅的线性相关特征^[50](图 5b),表明上述样品的特征剩磁受到沉积岩倾角浅化的影响较小,样品测试结果可靠。

3 东海盆地古位置变化与迁移特征

3.1 东海盆地古地磁数据的古位置计算

3.1.1 基于古地磁数据的东海盆地古纬度计算

使用基于最大似然估计的 Arason-Levi 方法对热退磁实验中分离、识别出的东海钻井样品特征剩磁倾角数据进行了分析计算。对于样本量为 N 的纯磁倾角数据,其对数似然函数为^[51]:

$$h(\theta, \kappa) = N \ln \left[\frac{\kappa}{2 \sinh \kappa} \right] + \sum_{i=1}^N (\kappa \cos \theta \cos \theta_i + \ln [I_0(\kappa \sin \theta \sin \theta_i)]) + \sum_{i=1}^N \ln [\sin \theta_i] \quad (1)$$

其中, κ 为数据精度参数, θ 为磁倾角 I 的余角 ($\theta = 90^\circ - I$), $I_0(x)$ 为零阶双曲贝塞尔函数。

由于 $\ln(x)$ 为单调递增函数,因此在 $x > 0$ 时, h 在满足以下条件(公式 2)时在 (θ, κ) 处取得极大值:

$$\frac{\partial h}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial \kappa} = 0 \quad (2)$$

由公式(2)可导出如下迭代公式组:

$$\tan \hat{\theta}_{j+1} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\sin \theta_i \left[\frac{I_1(\hat{\kappa}_j \sin \theta_j \sin \theta_i)}{I_0(\hat{\kappa}_j \sin \theta_j \sin \theta_i)} \right] \right)}{\sum_{i=1}^N \cos \theta_i} \quad (3)$$

$$\hat{\kappa}_{j+1} = \left(\coth \hat{\kappa}_j - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \cos \hat{\theta}_{j+1} \cos \theta_i + \sin \hat{\theta}_{j+1} \sin \theta_i \left[\frac{I_1(\hat{\kappa}_j \sin \hat{\theta}_{j+1} \sin \theta_i)}{I_0(\hat{\kappa}_j \sin \hat{\theta}_{j+1} \sin \theta_i)} \right] \right\} \right)^{-1} \quad (4)$$

其中, $I_1(x)$ 为一阶双曲贝塞尔函数。将 θ 的算术平均值作为 θ 的初始值, θ 的倒数方差作为 κ 的初始值,然后交替使用公式(3)和公式(4)进行迭代,直到连续迭代的解变化很小,满足以下条件后(公式(5)和公式(6))完成迭代,对应的解记为 $(\hat{\theta}_1, \hat{\kappa}_1)$, 计算对数似然函数 $h_1 = h(\hat{\theta}_1, \hat{\kappa}_1)$ 的值。

$$\Delta \theta = |\hat{\theta}_{j+1} - \hat{\theta}_j| < 0.000001^\circ \quad (5)$$

$$\frac{\Delta \kappa}{\kappa} = \left| \frac{\hat{\kappa}_{j+1} - \hat{\kappa}_j}{\hat{\kappa}_{j+1}} \right| < 0.000001 \quad (6)$$

将 $h_1 = h(\hat{\theta}_1, \hat{\kappa}_1)$ 与边界值上的似然函数值 $h_2 = h(0^\circ, \hat{\kappa}_2)$ 、 $h_3 = h(180^\circ, \hat{\kappa}_3)$ 和 $h_4 = h(90^\circ, 0)$ 进行比较,得到对应最大值 $h_{\max}$ 的解 (θ, κ) 作为最大似然解,即该组数据的平均磁倾角。平均磁倾角的 95% 置信限的估计 α_{95} 由公式(7)计算得出。

$$\cos \alpha_{95} = 1 - \frac{N-1}{N(\kappa-1)+1} \left(20^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right) \quad (7)$$

对东海钻井样品的磁倾角数据应用上述迭代计算,获得了白垩纪—始新世时期 5 个阶段(134、108.5~105.7、66~61、61~56 和 49~34 Ma)的样品平均磁倾角,进而基于磁倾角 I 与采样点古纬度 λ 间的对应关系 $\tan I = 2 \tan \lambda$ ^[52] 计算出采样点对应的古纬度(表 2)。

3.1.2 东海盆地的古方位评估

值得注意的是,对于采样点 S3 与 S4 样品虽然同属早古新世(66~61 Ma),但是分别来自东海南部的丽水凹陷和北部的长江凹陷,采样点相距较远,因此二者的古纬度可用于评估东海盆地在研究时期的旋转方位。S3 与 S4 在早古新世期间的古纬

表 2 东海样品古地磁分析结果

Table 2 Paleomagnetic results of the samples from the East China Sea

年代	采样点 编号	岩性	样品数量 n	磁倾角 Inc / (°)	磁倾角置信 区间 α_{95} / (°)	精度参数 κ	采样点古纬度 λ_0 / (°)	参考点古纬度 λ / (°)	古纬度置信 区间 $\Delta \lambda$ / (°)
134	S1	安山岩	12	33.5	6.9	40.8	18.3	18.7	4.5
108.5~105.7	S2	凝灰岩	7	37.2	9.3	43.2	20.8	21.4	6.4
66~61	S3	砂岩	9	35.4	8.4	37.2	19.6	18.0	5.6
66~61	S4	砂岩	7	27.5	7.6	63.9	14.6	18.1	4.5
61~56	S5	砂岩	12	31.2	6.9	40.9	16.8	20.3	4.3
49~34	S6	砂岩	14	43.7	10.5	15.4	25.5	26.4	8.2

度分别为 19.6° 与 14.6° , 若以 S4 的现代经纬度为参考点、按照 S3 与 S4 的现代相对位置关系, 则 S3 与 S4 在该时期对应的古纬度分别为 14.9° 与 14.6° , 位置相当接近, 表明二者在早古新世期间的相对位置关系与现代相比无明显变化, 即东海盆地此时的旋转方位与现代基本一致 (图 6)。

3.1.3 早白垩世—中始新世东海的古纬度位置变化
为统一标准, 确定东海在研究时期的古位置变化, 我们将东海内部的 30°N 、 125°E 作为参考点 (表 2),

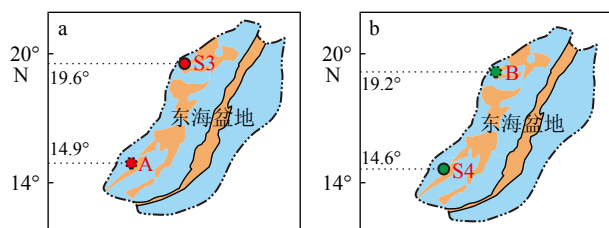


图 6 早古新世东海盆地南北部采点古位置对比

a: 基于 S3 数据的古位置, b: 基于 S4 数据的古位置。A 点为 S3 数据下对应的 S4 点古位置, B 点为 S4 数据下对应的 S3 点古位置。

Fig.6 Comparison of paleoposition of the northern and southern parts of the East China Sea Basin in the early Paleocene

a: Paleoposition based on S3 data, b: Paleoposition based on S4 data.

对东海的古纬度进行了变换计算。在具体计算中, 为了解决钻井古地磁数据缺少磁偏角 (旋转方位) 信息的问题, 鉴于前文发现该时期东海盆地缺少明显相对旋转的现象, 我们使用东海的现代旋转方位进行了计算。

结果表明, 东海在早白垩世—中始新世时期一直处于 15° 至 30° 之间的低纬度位置, 其参考点 (30°N 、 125°E) 在其中 5 个时代的古纬度位置依次为早白垩世早期 (约 134 Ma) 的北纬 $18.7^{\circ}\pm 4.5^{\circ}$ 、早白垩世晚期 (107.1 ± 1.4 Ma) 的北纬 $21.4^{\circ}\pm 6.4^{\circ}$ 、早古新世早期 (63.5 ± 2.5 Ma) 的北纬 $18.1^{\circ}\pm 4.5^{\circ}$ 、中古新世晚期 (58.5 ± 2.5 Ma) 的北纬 $20.3^{\circ}\pm 4.3^{\circ}$ 、中始新世 (41.5 ± 7.5 Ma) 的北纬 $26.4^{\circ}\pm 8.2^{\circ}$ 。

3.2 东海盆地古位置变化与迁移特征

为便于直观认识, 我们以华南地块晚侏罗世—始新世古地磁极数据^[53-55]及计算获得的古纬度作为对比和参考点, 来分析和说明东海盆地古纬度位置的变化与迁移特征。

3.2.1 华南地块古纬度计算

为便于与东海古纬度对比, 我们将华南东部近海边缘上的 (30°N 、 120°E) 作为华南参考点, 来对华

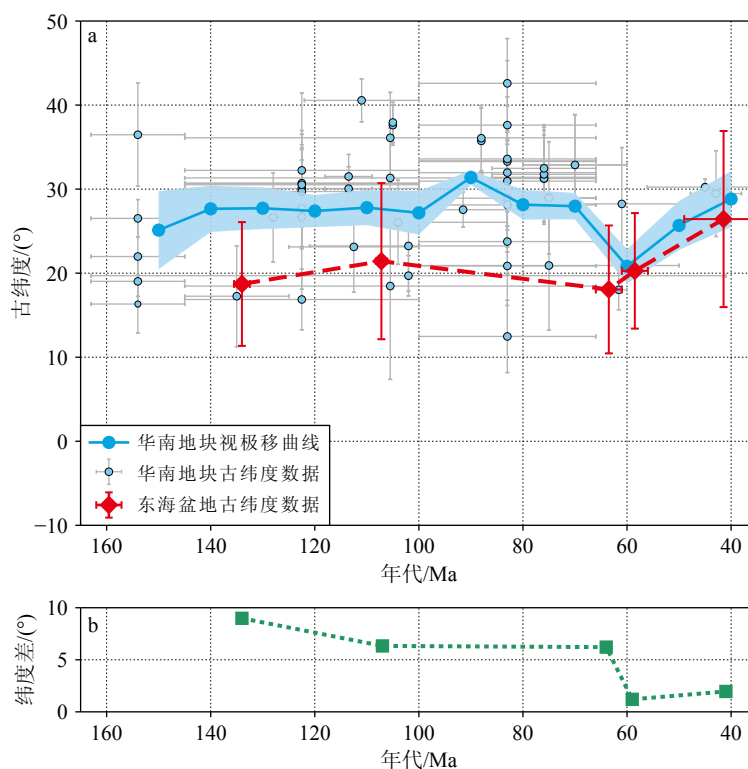


图 7 早白垩世—始新世 (145~40 Ma) 东海与华南的古纬度位置

a: 古纬度年代曲线, b: 华南对东海纬度差变化曲线。

Fig.7 Palaeolatitudinal positions of the East China Sea and South China Block during the Early Cretaceous to Eocene (145~40 Ma)

a: The paleolatitude variation, b: The variation in the latitudinal differences between the South China Block and the East China Sea.

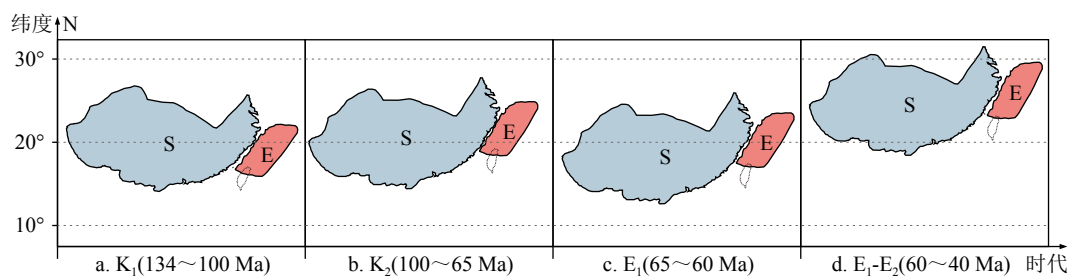


图8 早白垩世—始新世东海盆地古位置变化与迁移特征。

a: 早白垩世晚期(135~100 Ma), b: 晚白垩世(100~65 Ma), c: 早—中古新世(65~60 Ma), d: 早—中始新世(60~40 Ma)。

E: 东海盆地, S: 华南地块。

Fig.8 Characteristics of paleolocation migration of the East China Sea Basin during the Early Cretaceous to Eocene

a: late Early Cretaceous (135~100 Ma), b: Late Cretaceous (100~65 Ma), c: Early-Middle Paleocene (65~60 Ma), d: Early-Middle Eocene (60~40 Ma).

E: East China Sea Basin, S: South China Block.

南古地磁数据对应的古纬度位置进行统一的计算(图7a)。在此基础上,为了给出华南的连续位置变化,我们使用 Vaes 方法^[56]建立了华南的古纬度视极移曲线(APWP),结果显示华南的纬度位置在20~30°之间波动(图7a)。

3.2.2 东海盆地古位置变化与迁移特征

在以上计算基础上,在东海数据点覆盖的134~40 Ma 范围内,对东海钻井古地磁数据和华南 APWP 数据点进行了线性插值和纬度差计算,对比分析结果表明(图7b),自早白垩世早期(134 Ma)至中始新世(40 Ma)期间,东海的纬度位置与华南接近,二者经历了纬度差持续缩小、位置逐渐靠近的三阶段过程(图8):阶段①,从早白垩世早期至早古新世早期(约134~65 Ma),东海位于20°N左右的低纬度位置,东海与华南之间的纬度差从9.0°缓慢降至6.2°;阶段②,从早古新世早期到中古新世末(约65~60 Ma),东海快速向北移动,二者之间的纬度差从6.2°快速降至1.2°;阶段③,从中古新世末到中始新世(约60~40 Ma),东海继续向北迁移至超过25°N的位置,二者之间的纬度差为1.2°~2.0°,东海与华南之间形成了接近现代的空间格局,作为一个整体同步运动。

另外,值得注意的是,在上述纬度差计算中,潜在的沉积岩倾角浅化作用可能会改变块体之间的运动量,但其并不影响二者之间构造亲缘性的结论。

4 结论

(1) 首次对东海盆地9口钻井岩芯采样的系统古地磁测试研究结果表明,东海在早白垩世—中始新世时期一直处于15°至30°之间的低纬度位置,其参考点(30°N、125°E)在其中5个时代的古纬度位

置依次为早白垩世早期(约134 Ma)的北纬 $18.7^{\circ} \pm 4.5^{\circ}$ 、早白垩世晚期(107.1 ± 1.4 Ma)的北纬 $21.4^{\circ} \pm 6.4^{\circ}$ 、早古新世早期(63.5 ± 2.5 Ma)的北纬 $18.1^{\circ} \pm 4.5^{\circ}$ 、中古新世晚期(58.5 ± 2.5 Ma)的北纬 $20.3^{\circ} \pm 4.3^{\circ}$ 、中始新世(41.5 ± 7.5 Ma)的北纬 $26.4^{\circ} \pm 8.2^{\circ}$ 。

(2) 对东海同时期、不同采样点的样品进行古纬度对比分析发现,早古新世丽水凹陷与长江凹陷之间的相对位置关系与现代相比无明显变化,此时东海盆地的旋转方位与现代方位基本一致。

(3) 基于东海古地磁数据的古位置重建和对比分析发现,自早白垩世早期(134 Ma)至中始新世(40 Ma)期间,东海始终位于华南的东南位置,表现出密切的古地理位置关系和构造亲缘性。东海与华南之间经历了纬度差持续缩小、位置靠近的3个阶段的变化:阶段①,从早白垩世早期至早古新世早期(约134~65 Ma),东海与华南之间的纬度差从9.0°缓慢降至6.2°;阶段②,从早古新世早期到中古新世末(约65~60 Ma),二者之间的纬度差从6.2°快速降至1.2°;阶段③,从中古新世末到中始新世(约60~40 Ma),二者之间的纬度差为1.2°~2.0°,东海与华南之间形成了接近现代的空间格局与同步运动。

致谢: 感谢中海石油(中国)有限公司上海分公司、中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司对东海盆地钻井古地磁岩芯样品采集的支持与帮助。本文系第二十七届中国科协年会学术论文。

参考文献 (References)

- [1] Suo Y H, Li S Z, Cao X Z, et al. Mesozoic-Cenozoic basin inversion

- and geodynamics in East China: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 210: 103357.
- [2] Liu Y M, Liu L J, Li Y C, et al. Global back-arc extension due to trench-parallel mid-ocean ridge subduction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 600: 117889.
- [3] Hu L C, Li N, Fu X W, et al. Unveiling the ~110 Ma continental arc in South China: geochemical and isotopic insights from offshore magmatic records in the East China Sea Basin[J]. *Gondwana Research*, 2025, 143: 239-255.
- [4] Zhao W Z, Wang Z C, Li J M, et al. Natural gas resources of the sedimentary basins in China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(4-5): 309-319.
- [5] Ye J R, Qing H R, Bend S L, et al. Petroleum systems in the offshore Xihu Basin on the continental shelf of the East China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(8): 1167-1188.
- [6] 徐发. 东海陆架盆地新生界结构特征及迁移规律 [J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(6): 1-7. [XU Fa. Characteristics of Cenozoic structure and tectonic migration of the East China Sea Shelf Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(6): 1-7.]
- [7] Zhu W L, Zhong K, Fu X W, et al. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: a new view[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 89-111.
- [8] Niu Y L, Liu Y, Xue Q Q, et al. Exotic origin of the Chinese continental shelf: new insights into the tectonic evolution of the western Pacific and eastern China since the Mesozoic[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(18): 1598-1616.
- [9] Suo Y H, Li S Z, Zhao S J, et al. Continental margin basins in East Asia: tectonic implications of the Meso-Cenozoic East China Sea pull-apart basins[J]. *Geological Journal*, 2015, 50(2): 139-156.
- [10] Zhang J P, Li S Z, Suo Y H. Formation, tectonic evolution and dynamics of the East China Sea Shelf Basin[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 162-175.
- [11] Xu J Y, Ben-Avraham Z, Kelty T, et al. Origin of marginal basins of the NW Pacific and their plate tectonic reconstructions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 154-196.
- [12] Ding W W, Li J B, Wu Z C, et al. Late Mesozoic transition from Andean-type to Western Pacific-type of the East China continental margin—Is the East China Sea basement an allochthonous terrain?[J]. *Geological Journal*, 2018, 53(5): 1994-2002.
- [13] Fu X W, Ding W W, Dadd K, et al. An exotic origin of the eastern East China Sea basement before ~ 150 Ma[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(19): 1939-1942.
- [14] Yang C Q, Han B F, Yang C S, et al. Mesozoic basin evolution of the East China Sea Shelf and tectonic system transition in Southeast China[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(1): 239-252.
- [15] Li S Z, Suo Y H, Li X Y, et al. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 91-137.
- [16] Li C F, Zhou Z Y, Ge H P, et al. Rifting process of the Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. *Tectonophysics*, 2009, 472(1-4): 135-147.
- [17] Wei X D, Ding W W, Christeson G L, et al. Mesozoic suture zone in the East China Sea: evidence from wide-angle seismic profiles[J]. *Tectonophysics*, 2021, 820: 229116.
- [18] Huang B C, Yan Y G, Piper J D A, et al. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the East Asian blocks during Late Paleozoic and Early Mesozoic times[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 8-36.
- [19] Vaes B, van Hinsbergen D J J, Boschman L M. Reconstruction of subduction and back-arc spreading in the NW Pacific and Aleutian Basin: clues to causes of cretaceous and Eocene plate reorganizations[J]. *Tectonics*, 2019, 38(4): 1367-1413.
- [20] Zhao J, Huang B C, Yan Y G, et al. Late Triassic paleomagnetic result from the Baoshan Terrane, West Yunnan of China: implication for orientation of the East Paleotethys suture zone and timing of the Sibumasu-Indochina collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 111: 350-364.
- [21] Yang Z Y, Courtillot V, Besse J, et al. Jurassic paleomagnetic constraints on the collision of the North and South China blocks[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(6): 577-580.
- [22] 黄宝春, 周姚秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程 [J]. *地学前缘*, 2008, 15(3): 348-359. [HUANG Baochun, ZHOU Yaoliu, ZHU Rixiang. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(3): 348-359.]
- [23] van Hinsbergen D J J. Indian plate paleogeography, subduction and horizontal underthrusting below Tibet: paradoxes, controversies and opportunities[J]. *National Science Review*, 2022, 9(8): nwac074.
- [24] Meng J, Wang C S, Zhao X X, et al. India-Asia collision was at 24°N and 50 Ma: palaeomagnetic proof from southernmost Asia[J]. *Scientific reports*, 2012, 2(1): 925.
- [25] van de Lagemaat S H A, Pastor-Galán D, Zanderink B B G, et al. A critical reappraisal of paleomagnetic evidence for Philippine Sea Plate rotation[J]. *Tectonophysics*, 2023, 863: 230010.
- [26] Liu W, Liu Q S, Hu J S, et al. Complexity of the Oligocene meridional motion of the Philippine Sea Plate[J]. *Geology*, 2025, 53(2): 140-144.
- [27] Liu Y M, Hao F, Wu Z P, et al. Characteristics and origin of rift migration within the East China Sea Basin: coupling relation with deep mantle dynamics[J]. *Journal of Structural Geology*, 2025, 191: 105334.
- [28] Liang X X, Chen S, Ma B S, et al. Changes of tectonic regime of the East China Sea Shelf Basin since Mesozoic: insights from the Tiantai slope belt, East China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 259: 105900.
- [29] 赵志刚, 王鹏, 祁鹏, 等. 东海盆地形成的区域地质背景与构造演化特征 [J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 546-554. [ZHAO Zhigang, WANG Peng, QI Peng, et al. Regional background and tectonic evolution of East China Sea Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 546-554.]
- [30] 赵金海. 东海中、新生代盆地成因机制和演化 (上)[J]. *海洋石油*, 2004, 24(4): 6-14. [ZHAO Jinhai. The forming factors and evolution of the Mesozoic and Cenozoic basin in the East China Sea[J]. *Offshore Oil*, 2004, 24(4): 6-14.]
- [31] Zang Y B, Li S Z, Guo L L, et al. Similarity and differentiation between the East China Sea Shelf Basin and Cenozoic basins in the northeast South China Sea[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 304-

- 317.
- [32] 韩波. 东海地球物理场及深部地质构造研究 [D]. 中国科学院研究生院 (海洋研究所) 博士学位论文, 2008. [HAN Bo. Geophysical field and deep tectonic features of East China Sea[D]. Doctor Dissertation of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2008.]
- [33] 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化 [J]. *地质学报*, 2020, 94(3): 675-691. [LIU Jinshui, XU Huaizhi, JIANG Yiming, et al. Mesozoic and Cenozoic basin structure and tectonic evolution in the East China Sea basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(3): 675-691.]
- [34] 王磊, 李春峰, 李珂迪, 等. 东海陆架盆地中生代残留地层特征及其构造启示 [J]. *海洋学研究*, 2022, 40(4): 11-24. [WANG Lei, LI Chunfeng, LI Kedi, et al. Characteristics and tectonic implications of the Mesozoic residual strata in the East China Sea Shelf Basin[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2022, 40(4): 11-24.]
- [35] 李家彪. 东海区域地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 2008. [LI Jiabiao. Regional Tectonics of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.]
- [36] Yang C S, Li S Z, Li G, et al. Tectonic units and proto-basin of the East China Sea Shelf Basin: correlation to Mesozoic subduction of the Palaeo-Pacific Plate[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 149-161.
- [37] Cheng Y J, Wu Z P, Zhang J, et al. Cenozoic tectonic evolution of offshore Chinese Basins and its response to geodynamic processes of the East Asian Continental Margin[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 232: 104140.
- [38] Cheng Y J, Wu Z P, Xu B, et al. The Mesozoic tectonic evolution of the East China Sea Basin: new insights from 3D seismic reflection data[J]. *Tectonophysics*, 2023, 848: 229717.
- [39] Shang L N, Zhang X H, Jia Y G, et al. Late Cenozoic evolution of the East China continental margin: insights from seismic, gravity, and magnetic analyses[J]. *Tectonophysics*, 2017, 698: 1-15.
- [40] Tauxe L. Essentials of Paleomagnetism[M]. Berkeley: University of California Press, 2010.
- [41] 杨风丽, 徐铭辰, 庄圆, 等. 古生代中国中西部三大陆块古地理位置重建与演变 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(6): 265-276. [YANG Fengli, XU Mingchen, ZHUANG Yuan, et al. Paleozoic paleogeographic reconstruction and evolution of the three continental blocks of central and western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 265-276.]
- [42] 唐贤君, 李宁, 黄晓松, 等. 东海盆地西湖凹陷中下始新统宝石组再认识 [J]. *地层学杂志*, 2024, 48(4): 404-418. [TANG Xianjun, LI Ning, HUANG Xiaosong, et al. Reassessment of the Baoshi Formation of the Middle-Lower Eocene series in the Xihu Sag of the East China Sea Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2024, 48(4): 404-418.]
- [43] 谌微微, 杨风丽, 庄圆, 等. 利用古地磁学方法恢复钻孔岩心原始方位可靠性的探讨: 以塔里木盆地钻井为例 [J]. *地质科技通报*, 2023, 42(6): 266-280. [CHEN Weiwei, YANG Fengli, ZHUANG Yuan, et al. On the reliability of drilling core reorientations using palaeomagnetism methods: a case study from the boreholes in the Tarim Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(6): 266-280.]
- [44] Zijderveld J D A. AC demagnetization of rocks: analysis of results[M]//Runcorn S K, Creer K M, Collinson D W. Methods in Palaeomagnetism. Amsterdam: Elsevier, 1967: 254-286.
- [45] Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data[J]. *Geophysical Journal International*, 1980, 62(3): 699-718.
- [46] Li Y X, Wang S P, Fu S Y, et al. Recognizing the threshold magnetic anisotropy for inclination shallowing: implications for correcting inclination errors of sedimentary rocks[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2014, 2: 8.
- [47] Flinn D. On the symmetry principle and the deformation ellipsoid[J]. *Geological Magazine*, 1965, 102(1): 36-45.
- [48] 敖红, 邓成龙. 磁性矿物的磁学鉴别方法回顾 [J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 432-442. [AO Hong, DENG Chenglong. Review in the identification of magnetic minerals[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 432-442.]
- [49] 刘青松, 邓成龙, 潘永信. 磁铁矿和磁赤铁矿磁化率的温度和频率特性及其环境磁学意义 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(6): 955-962. [LIU Qingsong, DENG Chenglong, PAN Yongxin. Temperature-dependency and frequency-dependency of magnetic susceptibility of magnetite and maghemite and their significance for environmental magnetism[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 955-962.]
- [50] Hodych J P, Bijaksana S, Pätzold R. Using magnetic anisotropy to correct for paleomagnetic inclination shallowing in some magnetite-bearing deep-sea turbidites and limestones[J]. *Tectonophysics*, 1999, 307(1-2): 191-205.
- [51] Arason Þ, Levi S. Maximum likelihood solution for inclination-only data in paleomagnetism[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 182(2): 753-771.
- [52] Butler R F. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes[M]. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1992.
- [53] Meng J, Gilder S A, Li Y L, et al. Remagnetization age and mechanism of cretaceous sediments in relation to dyke intrusion, Hainan Island: Tectonic implications for South China and the Red River Fault[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(1): e2021JB023474.
- [54] Jeong D, Yu Y. Apparent polar wander path for East Asia and implications for paleomagnetic low inclination in sedimentary rocks[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2019, 289: 63-72.
- [55] Li S H, Advokaat E L, van Hinsbergen D J J, et al. Paleomagnetic constraints on the Mesozoic-Cenozoic paleolatitudinal and rotational history of Indochina and South China: review and updated kinematic reconstruction[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 171: 58-77.
- [56] Vaes B, van Hinsbergen D J J, van de Lagemaat S H A, et al. A global apparent polar wander path for the last 320 Ma calculated from site-level paleomagnetic data[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 245: 104547.