

全球岩石圈密度与磁化强度建模

基于地震 / 岩石学与卫星观测的联合反演

A unified inversion of lithospheric density & magnetization

张 壹 · Yi Zhang¹ · Mooney, W. D.³ · 孙石达 · Sun, S.² · 徐义贤 · Xu, Y.^{1*}

¹ 浙江大学 地球科学学院 *通讯作者 xyxian@zju.edu.cn

² 河北地质大学 地球科学学院 ³ U.S. Geological Survey, Earthquake Science Center

浙大地科 · 2026 · 浙江嘉善



岩石圈两大物理参数和位场观测

密度 (Density) —— 控制构造、俯冲、均衡、地幔对流等一切地球动力学过程。

磁化 (Magnetization) —— 反映地壳/地幔的磁性矿物组成与热状态 (居里等温面)。

重力 (Gravity) 包含所有深度密度异常的“积分响应”，垂向分辨有限；长波结构混叠地幔异常。

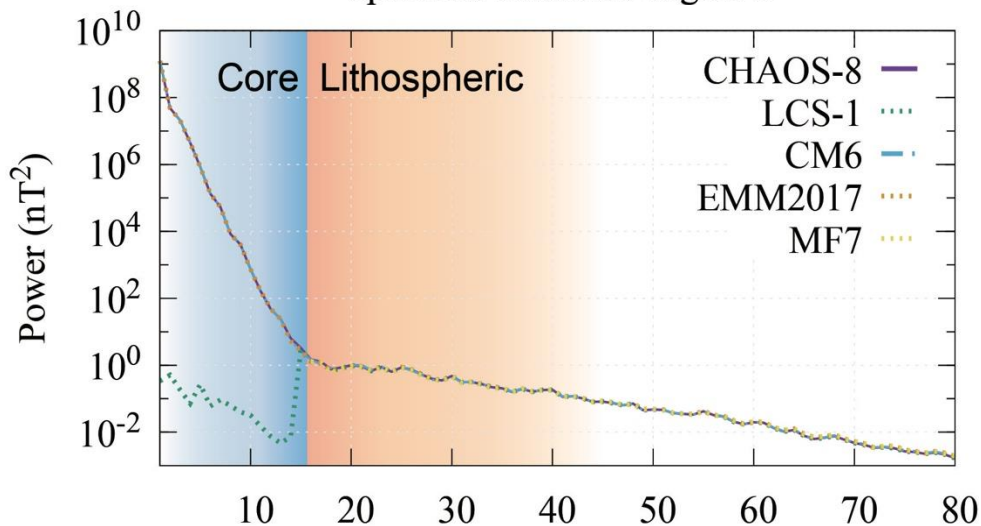
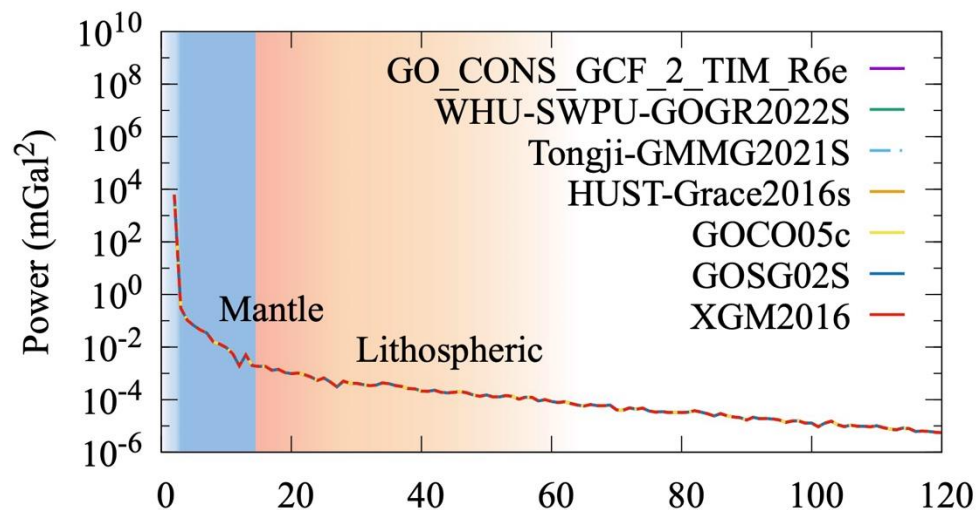
地磁场 (Magnetic)：长波部分被地核磁场掩盖、存在“磁湮灭子”，无法直接观测长波结构。

核心科学问题

如何在缺乏直接观测的频段，重建岩石圈在全球尺度、全波段的 **密度** 与 **磁化** 结构？

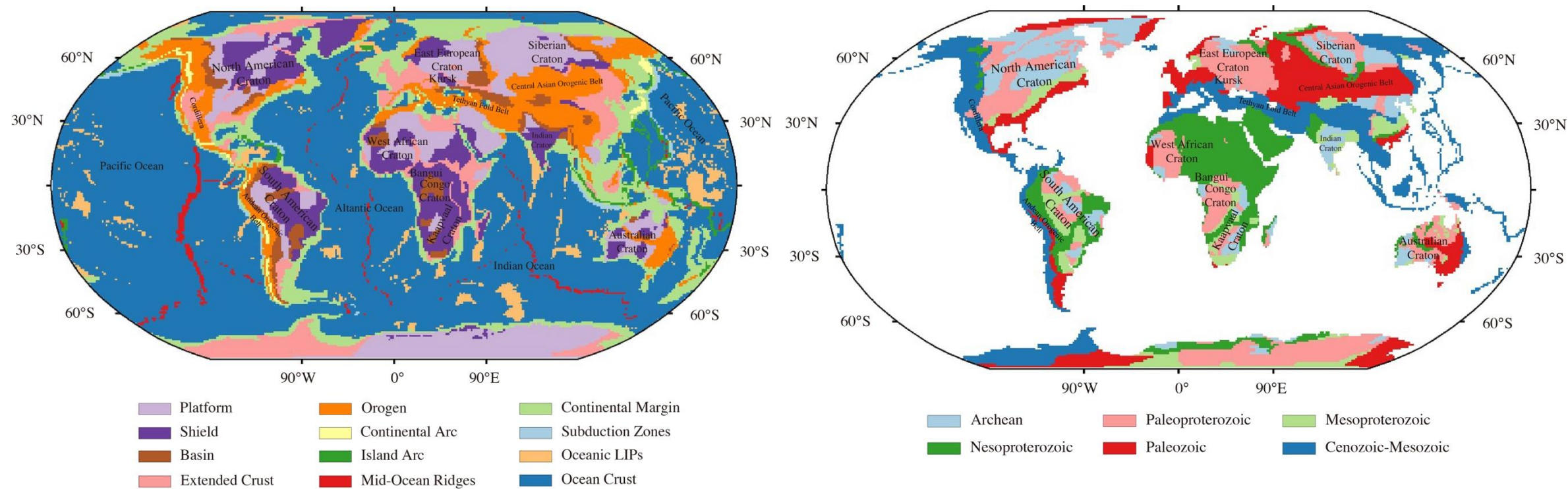
解决思路：地震 / 岩石学 (提供长波先验) + 卫星数据 (约束短波)

为什么研究“密度 × 磁化”？



卫星重磁异常模型功率谱

反演分析框架：等效源层 + 球谐域联合约束 + 地壳类型/基底年龄分组统计



磁化率反演

长波先验 · 岩石学模型
SM3-SI

短波观测 · 卫星磁模型
CHAOS-8

剩余磁化 · 海洋剩余磁化
(Sun et al. 2025)

输出 · 全球 VIS 模型 +
全波段岩石圈磁场

密度反演

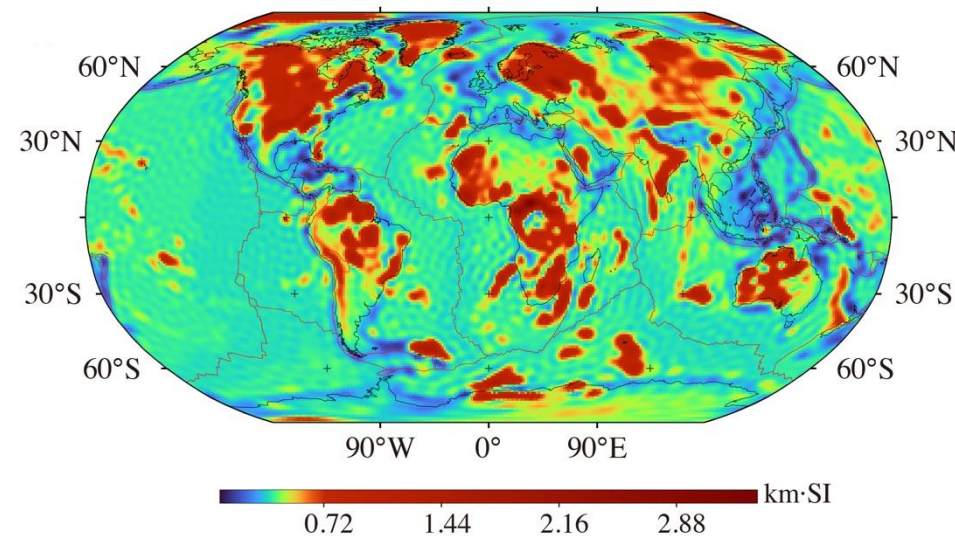
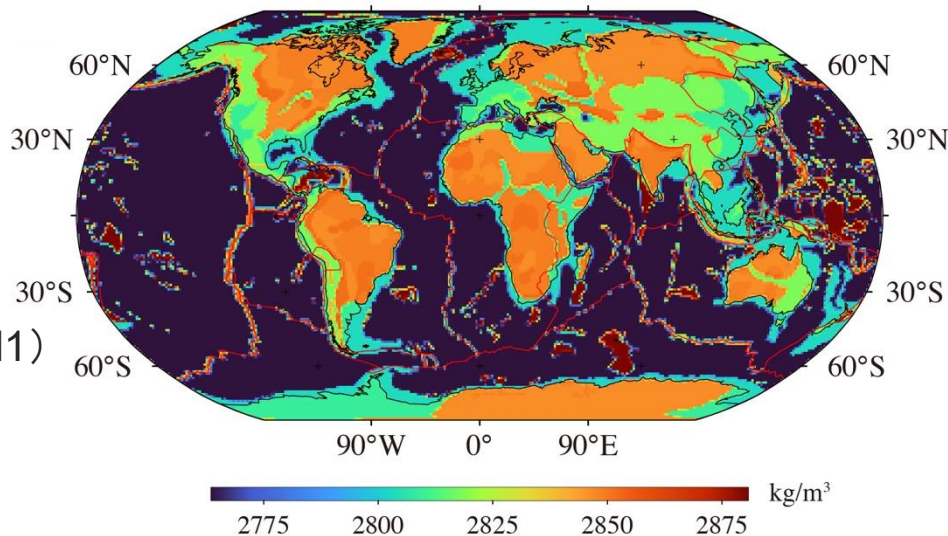
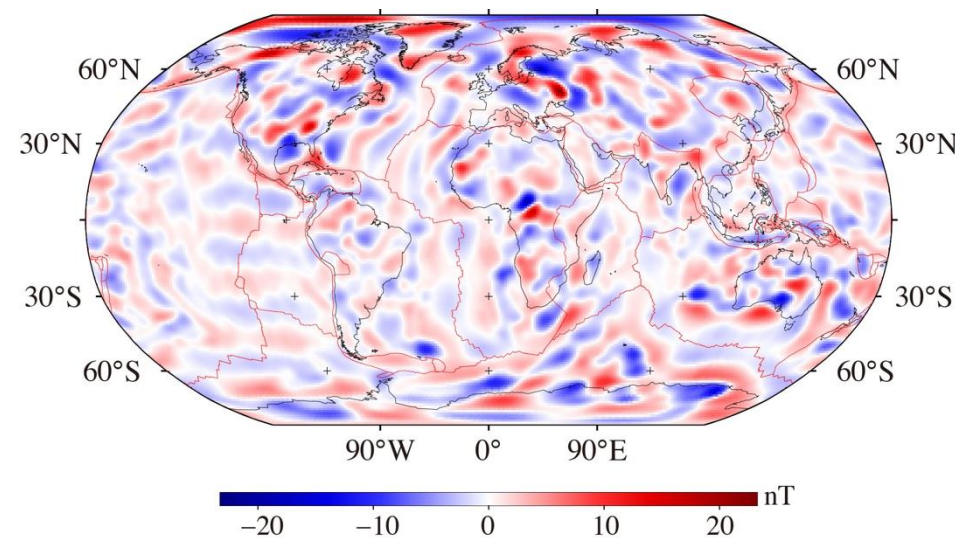
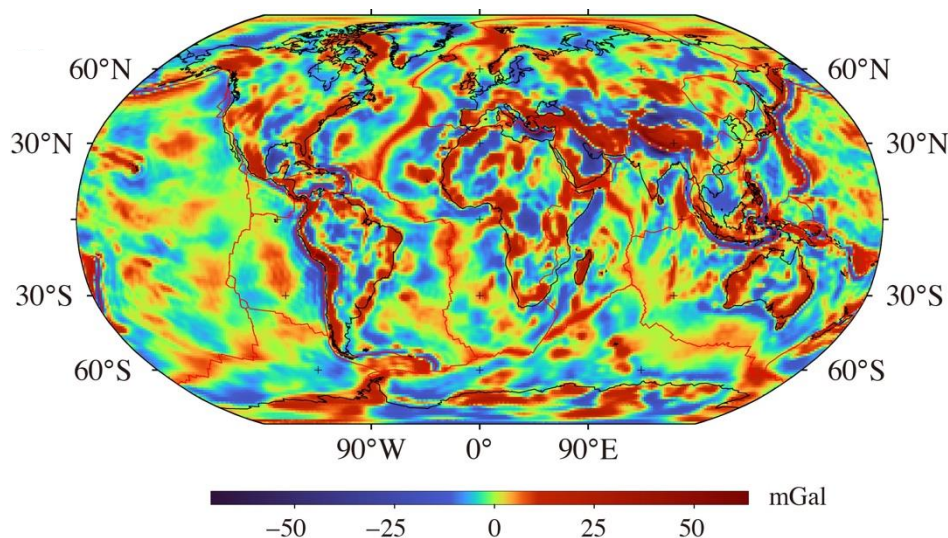
长波先验 · 地震密度模型
ECM1

短波观测 · 卫星重力模型
GOSG02S

界面框架 · Moho (ECM1)
, LAB (Steinberger &
Becker. 2018)

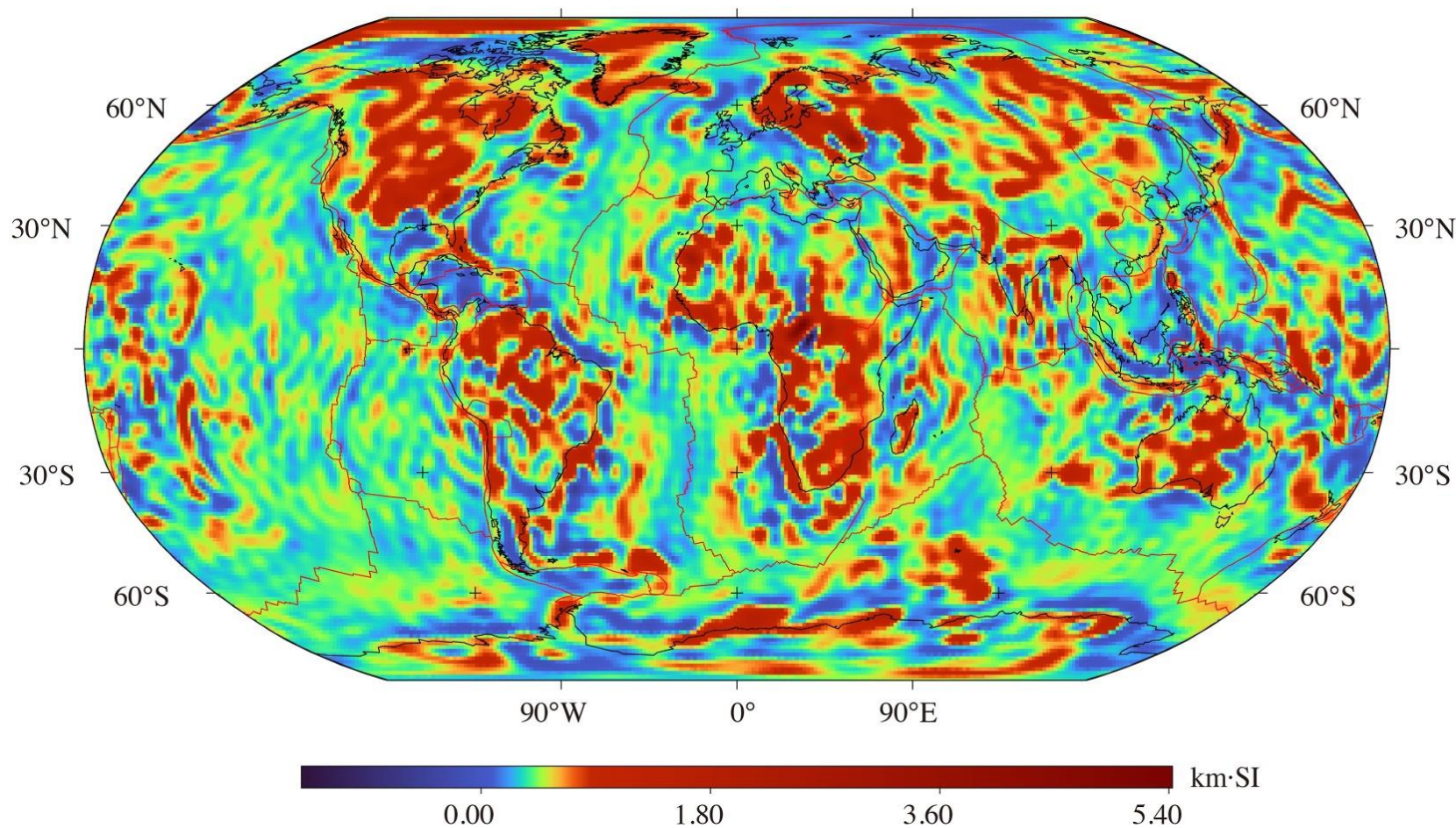
输出 · 全球地壳密度模型 +
全波段重力场

卫星重力异常 (GOSG02S; SH 13-120) 和磁异常 (CHAOS-8; SH 16-80)



地壳密度模型 (ECM1) 和磁 VIS 模型 (SM3-SI)

全球岩石圈感应磁化强度（VIS）模型与主要特征

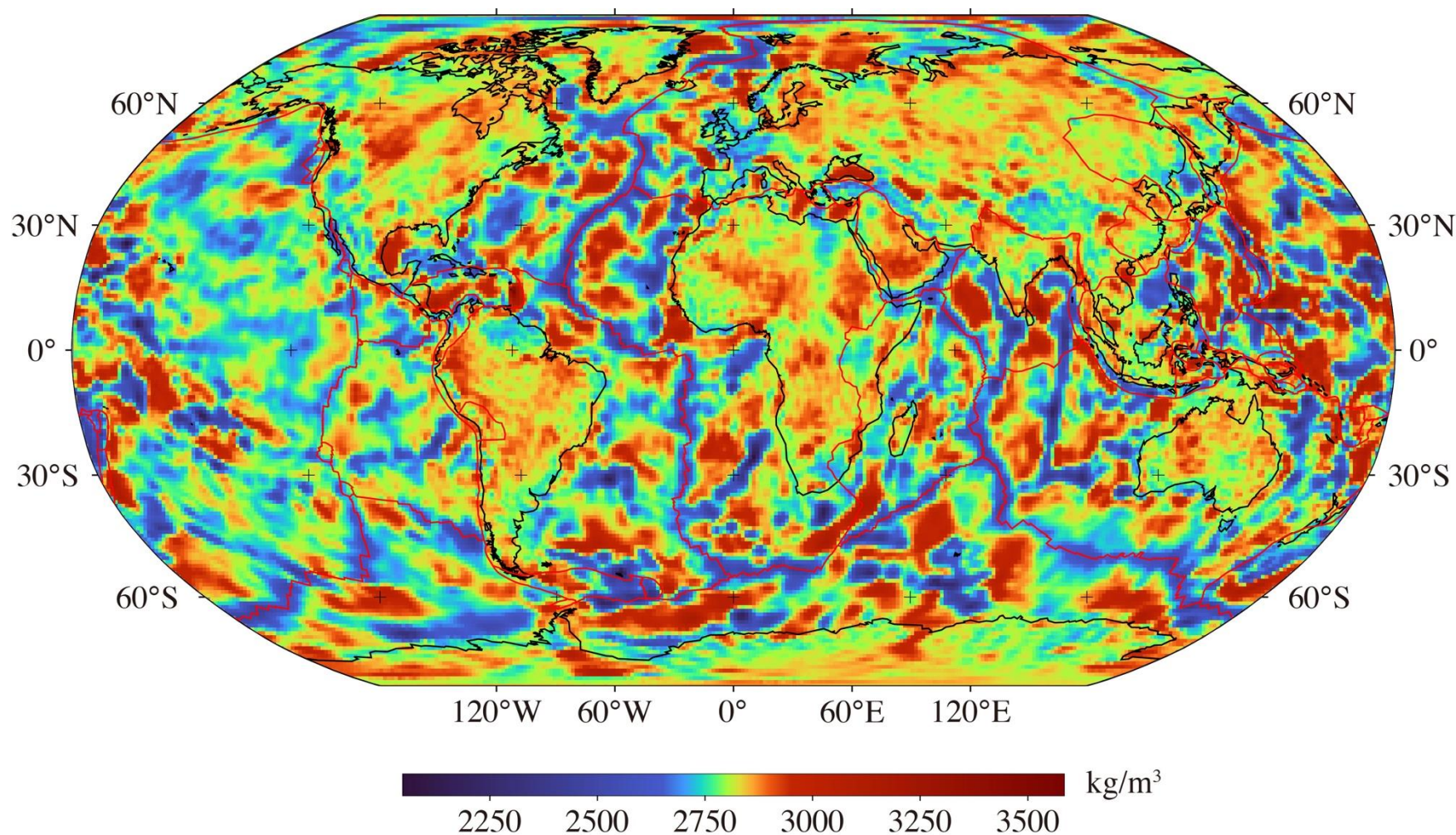


岩石圈感应磁化强度 VIS 模型

关键特征

- **克拉通**：冷而厚、居里面深、磁性矿物富集 → 高VIS
- **造山带/伸展**：地壳变薄、磁性物质少、居里面浅 → 低VIS
- **洋脊/洋壳**：高热流去磁 → VIS 最低 (<0.4)
- **岛弧/俯冲**：冷板片+蛇纹石化地幔楔 → 高VIS（**首次在模型级别定量确定**）
- **大洋LIP/高原**：厚玄武岩壳+白垩纪强磁化+深部蛇纹岩化 → 高VIS

全球地壳密度模型与“大陆 vs 海洋”的差异



全球地壳密度模型

大陆：

- 盆地/地台最高 (≈ 2866)
- 造山带最低 (≈ 2810)

海洋：

- 中洋脊最低 (≈ 2647)
- 岛弧/俯冲带高密高磁化
(但错位，反映特定的俯冲结构)
- 海洋LIP 却低密 (≈ 2649)

密度与磁化共同受岩石圈厚度与热体制控制

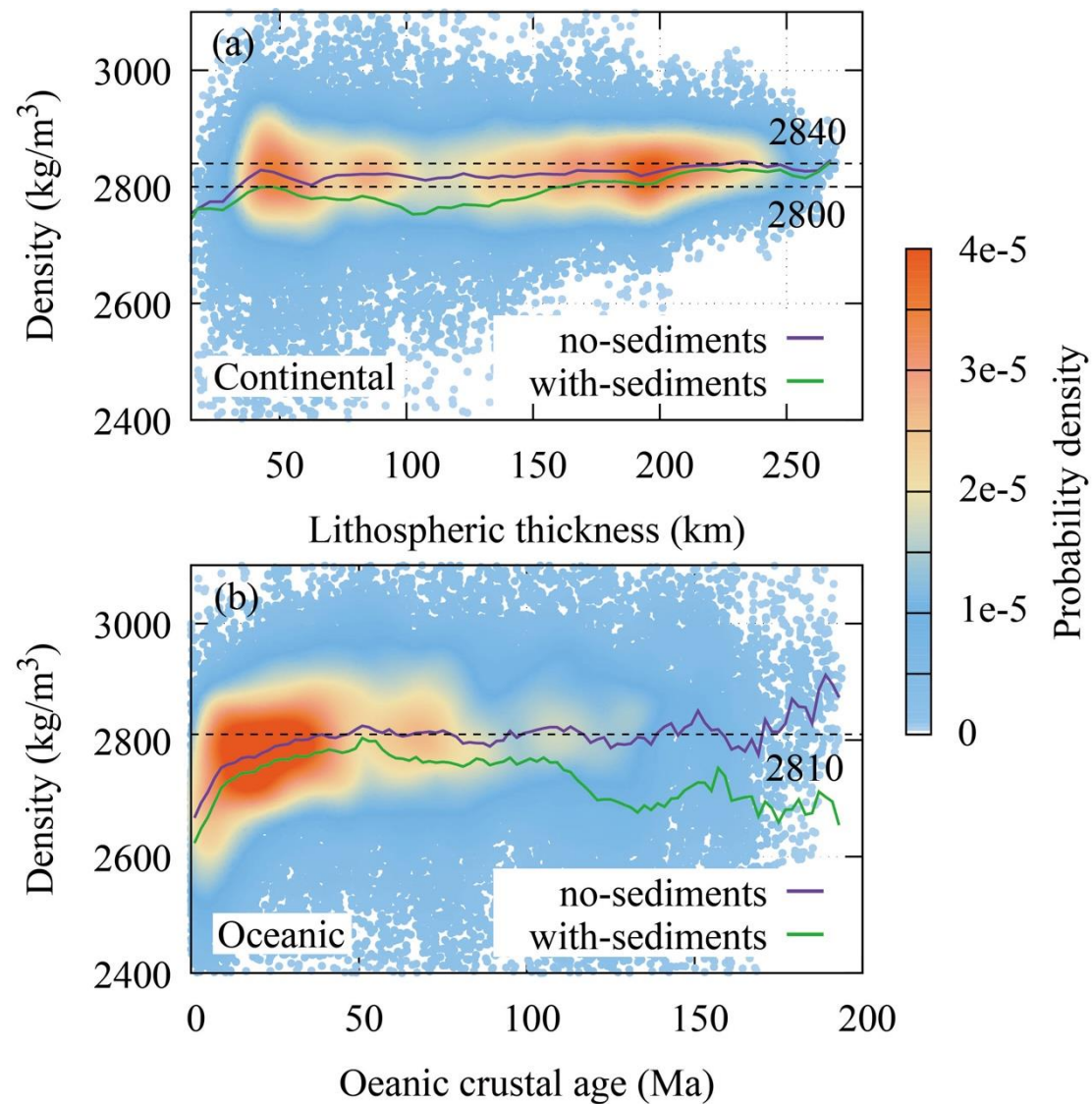
热-构造成因的双重控制

密度随厚度增大：薄而活跃（热）岩石圈低密，厚而稳定（克拉通）高密——热体制差异。

磁化集中在冷而厚的克拉通：盾/台/盆高 VIS，源于丰富铁镁质磁性矿物与深居里面。

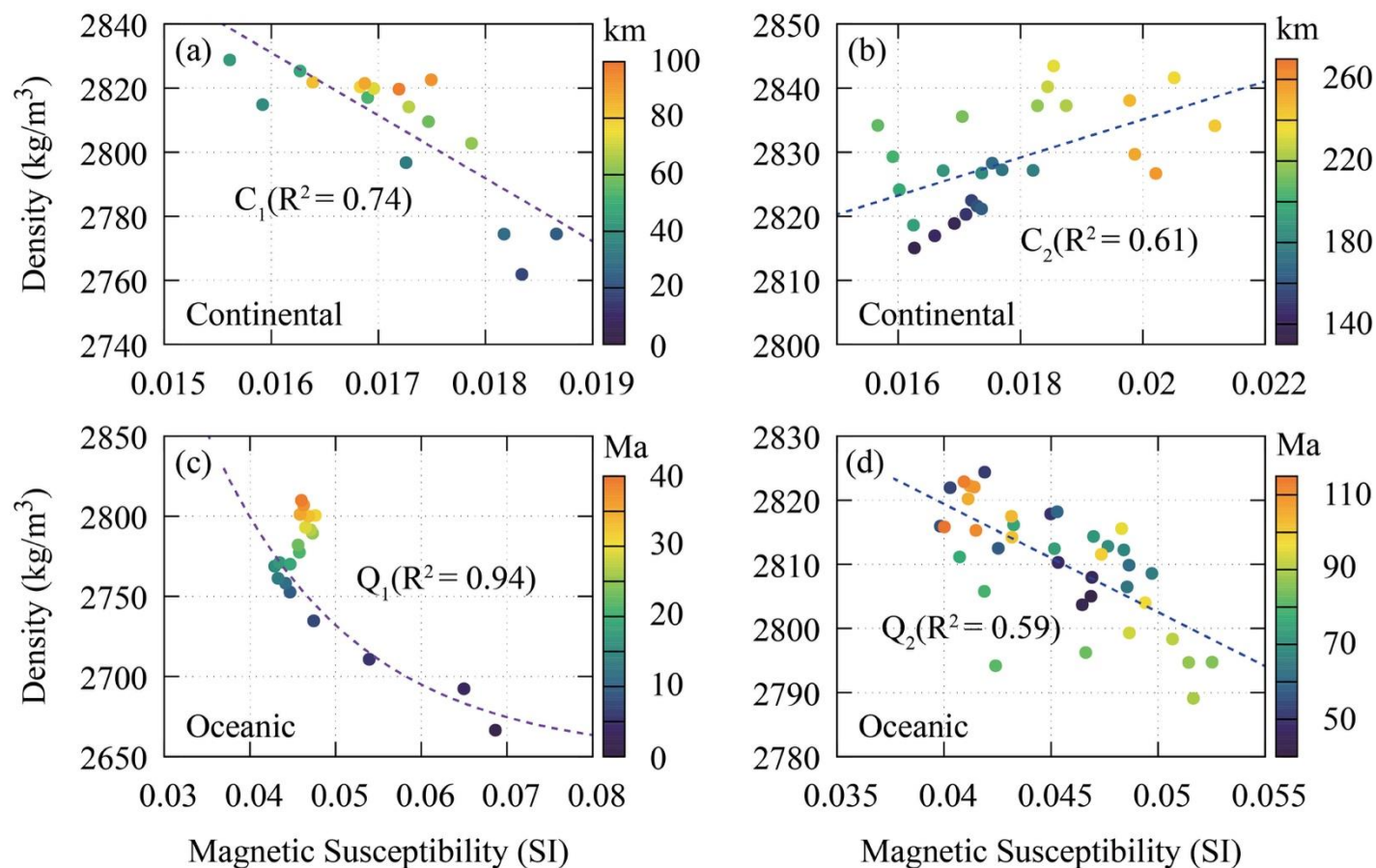
岩石圈地幔贡献有限：克拉通地幔镁数高、磁性矿物少；年轻地幔虽富磁性矿物但热梯度高。

均衡方式：大陆更符合 Airy 型、海洋更接近 Pratt 型（密度变化幅度不同，Moho起伏幅度也不同）。



(a) 大陆地壳密度随LAB变化曲线,
(b) 海壳密度随年龄变化曲线

密度-磁化率耦合：热区负相关，冷区正相关



不同岩石圈厚度（a 热区、b 冷区）与海洋年龄（c < 40 Ma、d > 40 Ma）下的密度-磁化率关系

热区·薄岩石圈 (LAB < 100 km)

负相关 ($R^2 \approx 0.74$)

铁镁质软流圈上涌富集磁铁矿 → 磁化率↑

热致膨胀 → 密度↓。

冷区·厚克拉通 (LAB > 130 km)

正相关（组成驱动）

下地壳铁镁质富集 → 密度与磁化率同步升高的累积组成效应。

大洋 LIP“低密度却高磁化”→ 蛇纹石化的浮力贡献

洋底高原拥有厚玄武岩壳，却比正常洋壳更“轻”。

常规认知

玄武岩质地壳 → 岩石样品密度高（ $2900\text{--}3250\text{ kg/m}^3$ ）、应较重

我们的密度模型

大洋 LIP 平均密度 $\approx 2649\text{ kg/m}^3$ ，显著低于正常洋壳（ ≈ 2789 ）

同时高磁化

LIP 磁化率 $\approx 0.61\text{ km}\cdot\text{SI}$ （接近地台水平）+ 低热流 $\geq$ 白垩纪强磁化

一致的解释：岩石圈地幔的广泛水合 / 蛇纹石化

低密度：蛇纹石化使地幔体积膨胀、密度下降（+ 大量含水矿物）。

高磁化：蛇纹石化显著提高磁铁矿含量 → 磁化率升高；叠加白垩纪超静磁带（CNS）的古剩余磁化。

低热流、长期稳定：轻而强的 LIP 因浮力得以长期稳定、不易俯冲 —— 对理解洋底高原的“长寿谜题”给出新约束。

同样机理见于岛弧/俯冲带：板片脱水 → 地幔楔蛇纹石化 → 高磁化 + 高密度（榴辉岩化）。

谢谢！敬请指正

Thank you · Questions & Discussion welcome

2026

Magnetization

Published

Lithospheric magnetization derived from petrological and satellite constraints

Zhang, Y., Sun, S., Mooney, W. D., & Xu, Y. · Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 131(1), e2025JB032111

DOI: [10.1029/2025JB032111](https://doi.org/10.1029/2025JB032111)

2026

Density

In Review

Lithospheric density variations derived from seismic and satellite gravity constraints

Zhang, Y., Mooney, W. D., Sun, S., & Xu, Y. · Journal of Geophysical Research: Solid Earth

(in review)