

测绘遥感向地球深部进军

李德仁

武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430079

E-mail: drli@whu.edu.cn

Towards probing the deep Earth with surveying and remote sensing

Deren Li

State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

E-mail: drli@whu.edu.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-0566](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0566)

近年来, 测绘遥感技术在地球科学领域的应用不断突破传统边界, 从地表观测向深地探测迈进。近期发表于*Nature Geoscience*的论文“Weak asthenosphere beneath the Eurasian interior inferred from Aral Sea desiccation”^[1]体现了这一领域的最新突破。该研究通过合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术, 捕捉中亚咸海(Aral Sea)因人为与自然因素干涸引发的长期地表形变, 首次定量揭示了欧亚大陆内部软流圈在10年尺度上的低黏度特征, 为理解板块内部流变学结构提供了新证据^[1]。这一成果不仅拓展了测绘遥感技术的应用场景, 更凸显了高分对地观测系统在地球深部动力学研究中的关键作用(图1)。

地震波信号显示地球具有地壳、地幔和地核分层结构。通过低地震波速特征人们还发现上地幔存在着一个由较软岩石构成的软流圈(asthenosphere)^[2]。软流圈的存在将地球外圈与内圈区别开^[3]。板块构造学说认为“刚性”的板块“漂浮”于上地幔软流圈之上进行水平运动, 导致了大洋扩张、大陆裂解和碰撞造山闭合, 并在板块边界产生地震、火山活动等^[4]。因此, 岩石圈-软流圈边界的深度及流变性质是控制板块运动、地幔对流和地震周期的重要参数^[5]。当地壳存在较大应力扰动时, 地表形变可以直接约束上地幔流变。传统研究主要通过大地震震后变形或者冰川均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)推断得到板块边界和高纬度地区的软流圈黏滞系数^[6], 但对大陆内部软流圈当前黏度的认知始终缺乏地表形变的约束。

中亚咸海曾经是世界第四大湖。由于人类活动和气候变化的影响, 从1960~2018年, 咸海的总体积减少超过1000 km³,

导致了超过1万亿吨的地表质量亏损。这么大的负载变化足以激发上地幔的响应, 但是因为其产生的地表形变幅度低、分布广, 如何有效测量是其中的关键。北京大学地球与空间科学学院王腾等人联合南方科技大学和美国南加州大学学者提出“短-长基线干涉组合”方法(短基线抑噪、长基线提取信号), 克服了InSAR大气延迟误差和时空失相干问题, 观测到咸海及其周边区域约60万平方公里范围内的地表形变。他们发现, 虽然咸海已经基本干涸, 但是咸海周围地表正在以每年最大7 mm的速度缓慢上升。在此基础上, 通过黏弹性数值模拟发现欧亚大陆内部软流圈的黏度为 $4 \times 10^{19} \sim 7 \times 10^{19}$ Pa s, 其黏度略大于俯冲带地幔楔处的黏度, 略小于海洋软流圈的估计值, 比冰川均衡调整研究中推断的高纬构造稳定区的黏度小1~2个量级。

咸海的案例启示我们: 人类活动不仅是地表环境的改造者, 也可能成为深地过程的“隐形推手”。咸海干涸这类人为环境干预可通过地表质量重新分布, 激活深部地幔的黏弹性响应, 进而影响区域地形演化。这一发现将“人类世”(anthropocene)的地质影响从地表扩展至岩石圈-软流圈系统, 不仅丰富了对欧亚大陆内部深部结构的认识, 还为理解地球内部物质循环和动力学过程提供了新的视角。

在深地研究中, 地表热流观测、地震波传播特征、重力与电磁场数据反演、实验室流变模拟、高温高压实验以及数值建模等多种手段对大陆内部软流圈黏度结构提出了不同层次的认识与模型, 将软流圈从“概念层”转化为可量化的动力学单元^[5]。近年来, 测绘与遥感技术的融合不断加深, 形

引用格式: 李德仁. 测绘遥感向地球深部进军. 科学通报, 2025, 70: 3800–3802

Li D. Towards probing the deep Earth with surveying and remote sensing (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 3800–3802, doi: [10.1360/CSB-2025-0566](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0566)

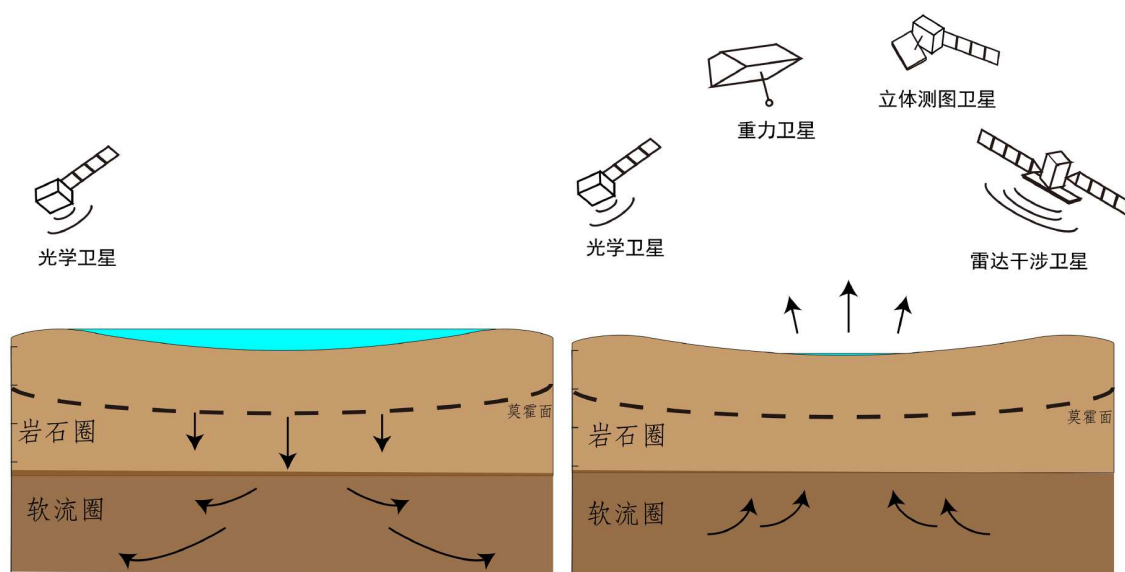


图1 多源对地观测卫星在上地幔流变研究中的作用

Figure 1 The roles of multi-source earth-observation satellites in probing mantle rheology

成了影像大地测量这一新的技术前沿^[7], 并不断突破传统测绘遥感的应用边界迈向深地研究。在咸海的研究中, 研究团队处理了6轨长条带雷达遥感数据获得了5年累积形变。而光学卫星三线阵立体成像技术和InSAR联合提供了不同时间咸海的湖底地形; 20世纪70年代开始的长时序光学卫星数据记录了咸海1960~2020年水域边界变化; 重力卫星观测分离了地下水流失的贡献(图1)。这一成果的取得充分彰显了多源遥感对地观测与地球物理模型协同创新在深地科学研究中的巨大潜力。

咸海和一系列利用影像大地测量方法对下地壳和上地幔流变性质的研究成果^[8,9]标志着遥感技术从“看地表”到“探

深地”, 从“静态测绘”到“动态过程”的发展态势, 响应了“向地球深部进军”这一国家战略号召。当前, 我国在深地领域不断加强原创性、引领性科技攻关, 各个学科之间的交叉越来越深入。相信随着我国对地观测卫星数据的积累以及新技术的发展, 我们将更加深入了解地球深部的结构、组成、过程和状态。我呼吁应充分认识到测绘遥感技术与深地科学交叉研究的重要性, 加强多学科协同合作, 不断探索和创新, 以期在深地科学研究领域取得更多的突破和成果, 为人类更好地认识地球、利用地球资源、保护地球环境作出更大的贡献。正如我所强调的, 未来遥感应突破“数据获取”的局限, 向“知识发现”迈进^[10,11]。

参考文献

- 1 Fan W, Wang T, Barbot S, et al. Weak asthenosphere beneath the Eurasian interior inferred from Aral Sea desiccation. *Nat Geosci*, 2025, 18: 351–357
- 2 Forsyth D W. The early structural evolution and anisotropy of the oceanic upper mantle. *Geophys J Int*, 1975, 43: 103–162
- 3 Anderson D L. Lithosphere, asthenosphere, and perisphere. *Rev Geophys*, 1995, 33: 125–149 [毛桐恩, 译. 岩石层、软流层和外围层(一). 世界地震译丛, 1997, (3): 79–89]
- 4 Morgan W J. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *J Geophys Res*, 1968, 73: 1959–1982
- 5 Fischer K M, Ford H A, Abt D L, et al. The lithosphere-asthenosphere boundary. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2010, 38: 551–575
- 6 Wright T J, Elliott J R, Wang H, et al. Earthquake cycle deformation and the Moho: implications for the rheology of continental lithosphere. *Tectonophysics*, 2013, 609: 504–523
- 7 Li Z H, Zhu W, Yu S, et al. Development status and trends of Imaging Geodesy (in Chinese). *Acta Geodaet Cartograph Sin*, 2023, 52: 1805–1834 [李振洪, 朱武, 余琛, 等. 影像大地测量学发展现状与趋势. 测绘学报, 2023, 52: 1805–1834]
- 8 Moore J D P, Yu H, Tang C H, et al. Imaging the distribution of transient viscosity after the 2016 M_w 7.1 Kumamoto earthquake. *Science*, 2017, 356: 163–167

- 9 Fan W, Wang T, Shi X. Lower crust viscosity in central Xizang inferred from InSAR derived deformation around Siling Co Lake after its rapid expansion in the 2000s. [Geophys Res Lett](#), 2023, 50: e2023GL104863
- 10 Li D R. Towards geo-spatial information science in big data era (in Chinese). *Acta Geodaet Cartograph Sin*, 2016, 45: 379–384 [李德仁. 展望大数据时代的地球空间信息学. 测绘学报, 2016, 45: 379–384]
- 11 Li D R, Xu X D, Shao Z F. On geospatial information science in the era of IoE (in Chinese). *Acta Geodaet Cartograph Sin*, 2022, 51: 1–8 [李德仁, 徐小迪, 邵振峰. 论万物互联时代的地球空间信息学. 测绘学报, 2022, 51: 1–8]