

饶维龙, 刘斌, 唐河, 汪秋昱, 张岚, 孙文科. 2025. 青藏高原地壳隆升的 GNSS 与 GRACE 联合研究进展. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(1): 26-44. doi: [10.19975/j.dqyxx.2024-019](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-019).

Rao W L, Liu B, Tang H, Wang Q Y, Zhang L, Sun W K. 2025. Progress in studies on crustal uplift of the Qinghai-Xizang Plateau based on GNSS and GRACE. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(1): 26-44 (in Chinese). doi: [10.19975/j.dqyxx.2024-019](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-019).

青藏高原地壳隆升的 GNSS 与 GRACE 联合研究进展

饶维龙^{1,2}, 刘斌¹, 唐河³, 汪秋昱³, 张岚⁴, 孙文科^{3*}

1 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114

2 公路地质灾变预警空间信息技术湖南省工程实验室, 长沙 410114

3 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

4 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要: 作为世界屋脊, 青藏高原现今的地壳隆升状态是地球科学的一个重要关注点, 对其地壳运动的观测与动力机制分析是深入认识该问题的关键. 随着卫星大地测量的快速发展, 以全球导航卫星系统 (GNSS) 和重力恢复与气候实验卫星 (GRACE) 为主的观测技术在青藏高原地球动力学研究中表现出巨大优势和潜力. GNSS 给出了精细的三维地壳变形结果, GRACE 提供了丰富的时变重力数据, 前人有效结合这两种资料对青藏高原地壳运动与固体物质迁移问题进行了充分研究, 较系统地评估了高原地壳隆升现状. 因此, 本文将综述当前联合 GNSS 与 GRACE 数据进行高原地壳隆升研究的科学进展, 涉及到高原地壳位移场与时变重力场观测、负荷变形估算与构造变形提取、地壳厚度与 Moho 面深度变化反演等研究成果, 本文还简单讨论分析青藏高原当前地壳隆升的环境背景与动力机制.

关键词: 青藏高原; 地壳隆升; GNSS; GRACE; 负荷变形

doi: [10.19975/j.dqyxx.2024-019](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-019)

中图分类号: P228

文献标识码: A

Progress in studies on crustal uplift of the Qinghai-Xizang Plateau based on GNSS and GRACE

Rao Weilong^{1,2}, Liu Bin¹, Tang He³, Wang Qiuyu³, Zhang Lan⁴, Sun Wenke^{3*}

1 School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

2 Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of Highway Geological Disaster

Early Warning in Hunan Province, Changsha 410114, China

3 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract: As the "Roof of the world", the current state of crustal uplift on the Qinghai-Xizang Plateau is a significant focus in Earth sciences due to its complex geodynamic environment and profound implications for regional and global climate, hydrology, and seismic activity. Understanding the mechanisms behind its uplift involves observing crustal movements and analyzing their dynamic processes in great detail. With the rapid development of

收稿日期: 2024-05-15; 录用日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42304028, 42104002); 湖南省自然科学基金资助项目 (2023JJ40022); 湖南省教育厅科学研究项目 (22C0154, 22B0346); 湖南省自然资源厅科技计划项目 (HBZ20240115); 长沙理工大学公路地质灾变预警空间信息技术湖南省工程实验室开放基金资助项目 (kfj220602)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42304028, 42104002), the Provincial Natural Science Foundation of Hunan (Grant No. 2023JJ40022), the Scientific Research Foundation of the Hunan Education Department (Grant Nos. 22C0154, 22B0346), the Research Foundation of the Department of Natural Resources of Hunan Province (Grant No. HBZ20240115), and the Open Fund of Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of Highway Geological Disaster Early Warning in Hunan Province (Changsha University of Science & Technology) (Grant No. kfj220602)

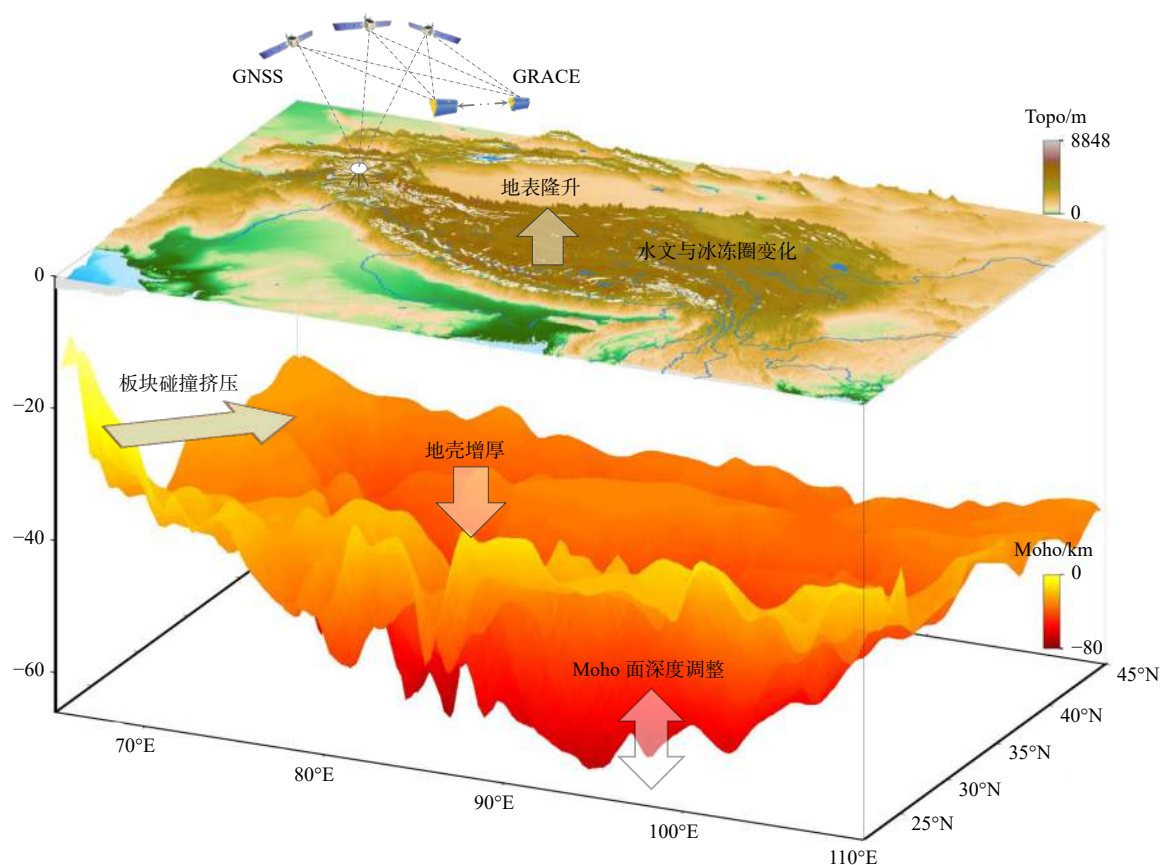
第一作者: 饶维龙, 男, 讲师, 主要从事卫星重力与地球动力学变化的研究. E-mail: raoweilong@csust.edu.cn

***通信作者:** 孙文科, 男, 教授, 主要从事地震位错理论及应用、重力变化观测与解释的研究. E-mail: sunw@ucas.ac.cn



satellite geodesy, observation technologies centered on the Global Navigation Satellite System (GNSS) and the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) have demonstrated remarkable advantages and potential in the geodynamic studies of the Qinghai-Xizang Plateau. GNSS provides highly detailed three-dimensional measurements of crustal deformation, enabling precise tracking of horizontal and vertical movements. Meanwhile, GRACE offers comprehensive time-varying gravity data, which is crucial for understanding mass redistribution within the Earth's crust and mantle. Previous research has effectively combined these two datasets to study the intricate processes of crustal movements and solid mass migration on the Qinghai-Xizang Plateau. This integrated approach has yielded quantitative results of vertical crustal movement, allowing for a systematic evaluation of the current state of uplift. The combination of GNSS and GRACE data has enabled researchers to delve deeper into the mechanisms driving the uplift, providing insights into the interaction between tectonic forces and surface processes. Therefore, this paper aims to review the scientific progress made in studying plateau crustal uplift by integrating GNSS and GRACE data. It will cover various aspects such as the observation of the plateau's crustal displacement field and time-varying gravity field, the estimation of load deformation and the extraction of tectonic deformation, and the inversion of changes in crustal thickness and the depth of the Moho interface. These research findings offer a comprehensive understanding of the geodynamic processes. Furthermore, the paper will briefly discuss the environmental background and dynamic mechanisms underlying the current crustal uplift of the Qinghai-Xizang Plateau.

Keywords: Qinghai-Xizang Plateau; crustal uplift; GNSS; GRACE; load deformation



青藏高原地壳隆升的 GNSS 与 GRACE 联合观测

GNSS and GRACE joint observation of crustal uplift in the Qinghai-Xizang Plateau

0 引言

青藏高原是受印度—欧亚板块相互碰撞挤压作用的核心区域 (Molnar and Tapponnier, 1975; Tap-

ponnier et al., 2001), 其地壳隆升历史可追溯到几十个百万年前 (李吉均等, 1979; Yin and Harrison, 2003; 钟大赉和丁林, 1996), 涉及到的历史高程推演、初始隆升时间、各期次隆升速率确定等问题是

地质学、地球化学、古生物学等学科的重大话题 (Ding et al., 2022; Herman et al., 2010; Rowley and Currie, 2006; 许志琴等, 1999). 丰富的研究已经回溯出了青藏高原隆升的粗略历史轮廓, 但要高原生长过程进行详细描述仍十分困难.

相反, 得益于现代大地测量技术的快速发展, 在认识青藏高原现今的地壳隆升问题中, 已经有了很好的观测条件与研究基础 (党亚民等, 2023; 刘经南等, 2000; 王琪等, 1996). 最早的青藏高原隆升研究始于 19 世纪 50 年代后的水准测量, 水准结果 (Jackson and Bilham, 1994; Ying et al., 1988) 显示青藏高原整体处于隆升的状态, 最大的隆升发生在喜马拉雅区域, 不同区域隆升速率存在较大差异. 最近, 中国地震局第一监测中心收集整理的青藏高原 11.6 万千米的精密水准资料, 研究结果显示测网中大部分测点呈现为垂直隆升特征, 高原南缘和东北缘两个构造区表现明显的隆升, 喜马拉雅东构造节邻近地区有显著下沉 (Wu et al., 2022). 水准观测对人们认识青藏高原地壳隆升具有重要意义, 然而其外业工作艰苦、受限因素多, 实现对青藏高原大范围与持续性观测是困难的.

卫星大地测量技术则因时空覆盖率高、观测成本低、精度高等优势, 在青藏高原地壳运动观测及其动力学研究中发挥重要作用. 一方面, 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS)、合成孔径雷达干涉测量技术 (InSAR) 等可以从几何形变角度来量化地壳运动状态. 具体而言, GNSS 可以实现测站三维毫米级精确定位, 能够实现不同时空尺度的地壳变形连续监测. InSAR 技术可以获取大范围、高时空分辨率的雷达视线方向地表形变场, 通过升降轨或融合多成像技术能重构出三维形变信息. 另一方面, 重力恢复与气候实验卫星 (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)、小卫星挑战计划 (Challenging mini-Satellite Payload, CHAMP) 等从重力场变化角度对地壳垂向运动反演进行了有效约束. 因为内部固体物质密度差异, 地壳垂向运动和壳幔物质调整均会引起区域重力场的变化, 从而被重力卫星捕捉到 (孙文科, 2002; 许厚泽等, 2005), 基于卫星重力资料可以实现区域地壳变形量的估算 (Fu and Freymueller, 2012; van Dam et al., 2007). 因而, 卫星大地测量技术成为青藏高原动力学研究的有效手段, 其中联合 GNSS 与 GRACE 的青藏高原地壳隆升研究已取得重要成果.

1 青藏高原地壳隆升环境

青藏高原有着复杂的构造环境 (图 1a), 在板块碰撞动力下高原地壳仍在不断增厚和隆升, 也进行着侧向伸展与物质逃逸, 形成了一系列各向伸展的大型活动断层和造山带 (邓起东等, 2002; 王琪, 2003; 张培震等, 2002). 高原及其周边区域地震、滑坡、火山等灾害频繁, 使其成为全球受自然灾害影响最为严重的内陆区域之一, 这些自然灾害一定程度上影响并改变着高原的高程 (崔鹏等, 2017). 另外, 青藏高原深层物质的密度差异、熔融与流变特征已被地震、大地电磁、地质学等学科研究结果所验证, 表明了高原内部物质的运动迁移与调整状态. 除地壳的刚性运动外, 区域深层地壳物质可能以通道流形式进行着各向运动, 印度板块的俯冲与物质补充使得青藏高原地壳增厚, 地幔对流、岩石圈拆沉过程进一步调整壳幔物质 (Bao et al., 2020; 陈凌等, 2022; Chen et al., 2017; Royden et al., 2008; 许志琴等, 2004; Yang et al., 2012). 这些深层动力作用影响着青藏高原地壳的垂向运动, 所以青藏高原的地壳隆升体现着其对地球深部机制的浅层响应.

同时, 青藏高原还有着独特的水文与气候环境 (图 1b), 是多种季风气候交汇区, 是除南北极外世界上冰川分布最广的区域, 拥有着众多湖泊、河流, 蕴藏着丰富的淡水资源, 供养着数十亿人口, 因而被称为“亚洲水塔”和“第三极” (Ma et al., 2010; Zhang et al., 2019). 我国第二次青藏高原综合科考发现, 全球变暖背景下青藏高原的升温更为强烈, 过去 50 年青藏高原冰川发生明显的面积萎缩与厚度减薄, 而湖泊面积增加了近一万平方公里, 河流径流量变化明显 (Duan and Wu, 2005; 姚檀栋, 2019; Yao et al., 2019; Zhou et al., 2009). 在这些地表水文质量源 (冰川、湖泊、积雪、冻土等) 的加载和卸载作用下, 具有黏弹性质的固体地球会产生相应的负荷响应, 区域水文和冰冻圈的负荷变形与全球尺度冰川均衡调整、海洋/大气负荷潮、固体潮等一起, 直接体现在青藏高原的现今地壳隆升观测中 (Fu and Freymueller, 2012; Peltier et al., 2015; Watson et al., 2006). 同样的, 受水文与气候调控的剥蚀沉积也是改变青藏高原地壳厚度的重要因素 (Métivier et al., 1999; Westaway, 1995). 所以, 青藏高原现今地壳隆升环境是十分复杂的. 研究青藏高原现今的地壳隆升及其机制机理, 有助于人们更

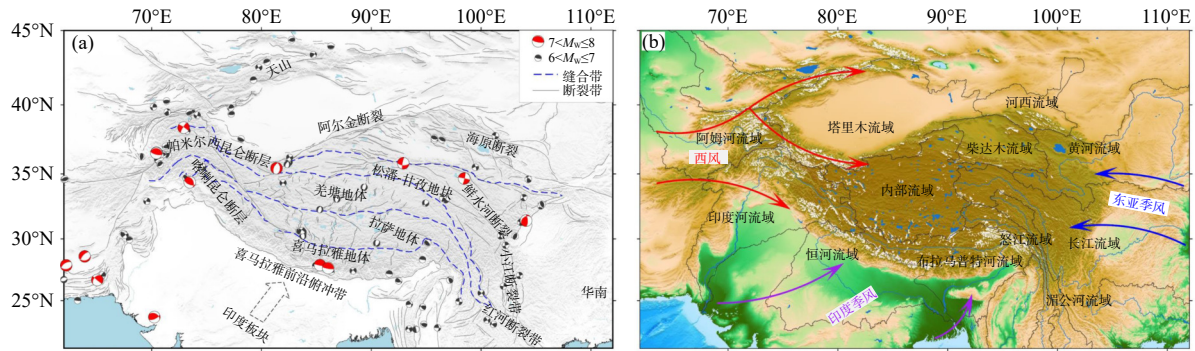


图 1 青藏高原构造与水文气候环境。(a) 青藏高原断层与地震活动分布, 断层数据来源于 Styron 等 (2010), 地震数据收集至 1980 年至今全球 CMT 数据集 (www.globalcmt.org), 蓝色虚线为主要缝合带分布, 虚线箭头表示板块碰撞动力方向; (b) 青藏高原季风、冰川、湖泊、流域分布 (引自 Rao and Sun, 2021)

Fig. 1 Tectonic and hydroclimate environment of the Qinghai-Xizang Plateau. (a) Distribution of faults and seismic activity on the Qinghai-Xizang Plateau. Fault data from Styron et al. (2010), seismic data collected from the Global Centroid Moment Tensor (CMT) dataset from 1980 to present (www.globalcmt.org). Blue dashed lines represent the distribution of major suture zones, with dashed arrows indicating the direction of plate collision dynamics. (b) Distribution of monsoons, glaciers, lakes, and river basins on the Qinghai-Xizang Plateau (from Rao and Sun, 2021)

好地认知多圈层耦合作用, 乃至通过青藏高原来认识地球系统。

2 青藏高原的卫星观测: GNSS 与 GRACE

GNSS 因其高精度、高效率成为区域地壳变形监测的主要手段。青藏高原区域 GNSS 观测是始于 1988 年中德合作的滇西地震预报试验场大地测量项目, 随后国内外机构相继开展了区域相关观测 (Bendick et al., 2000; 刘经南等, 1998; 游新兆等, 2001; 朱文耀等, 1998)。但中国大陆和青藏高原区域 GNSS 观测研究取得长足进步是在“中国地壳运动观测网络 (Crustal Movement Observation Network of China, CMONOC I)”和“中国大陆构造环境监测网络 (CMONOC II)”获批与实施

后。它们使得青藏高原及其周边区域台站资料得到了极大丰富, 此外在区域或国际项目的补充下, 至今已有 30 余年的观测资料积累, 成为深入研究青藏高原及其周边地区构造形成与演化的重要基础 (甘卫军, 2021; 王敏和沈正康, 2020; 张培震等, 2022)。图 2a 为现今青藏高原及其周边区域 GNSS 资料的台站信息 (Liang et al., 2013; Pan et al., 2018; Wang and Shen, 2020; Zhao et al., 2023)。在 GNSS 变形监测中, 原始时间序列除构造变形信息外, 还含有模型残差、解算误差、地表负荷变化、地震活动等引起的非构造变形。因而通过数学物理模型改正、成分分离等信号处理方法去除相关因素干扰, 是基于 GNSS 开展青藏高原动力学研究的重要前期工作 (Boehm et al., 2006; Dong et al., 2002; Tregoning and Watson, 2009; 王敏等, 2005; Watson et al., 2006), 对应的处理方法在姜卫平等 (2018) 研

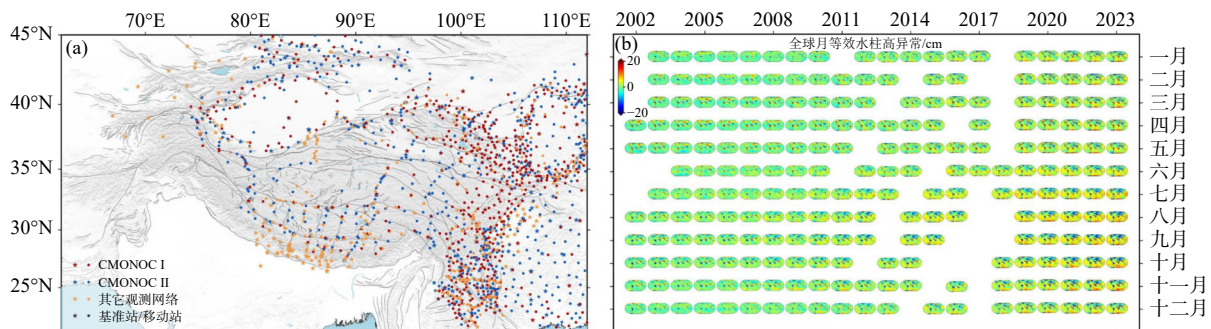


图 2 GNSS 与 GRACE 卫星观测基础。(a) 青藏高原及其周边区域台站分布, 背景为青藏高原断层分布 (引自 Wang and Shen, 2020); (b) 全球月重力场解模型 (数据来源于 CSR mascon)

Fig. 2 GNSS and GRACE satellite observations foundation. (a) Distribution of stations in the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas, with the background showing the distribution of faults in the Qinghai-Xizang Plateau (from Wang and Shen, 2020); (b) Global monthly gravity field model (data sourced from CSR mascon)

究中得到了系统梳理。

与 GNSS 这种直接的地壳变形观测技术相媲美的是重力卫星观测技术。分别于 2002 年 3 月与 2018 年 5 月发射的重力卫星 GRACE 与继任卫星 GRACE Follow-On 通过重力场变化观测可以直接研究区域物质迁移状态, 通过扣除地表层水圈和冰冻圈的重力信号后, 得到反映内部构造变形信号, 实现对内部动力过程的重力学约束 (Fu and Freymueller, 2012; Jiao et al., 2019; Kusche and Schrama, 2005; van Dam et al., 2007; Yi et al., 2014)。至今, GRACE 及 GRACE-FO 已发布 228 个月份的全球重力场模型 (图 2b), 其时变重力场模型反映的总物质迁移结果, 充分弥补了陆地水模型的不足与观测资料的稀缺 (Tapley et al., 2019), 除了被广泛应用于全球和青藏高原区域的冰冻圈、水圈、环境气候相关研究外 (Amin et al., 2020; Chambers et al., 2004; 常乐和孙文科, 2021; Chen et al., 2022; Feng et al., 2013; Yi et al., 2016; Zhan et al., 2017; 张岚和孙文科, 2022), 在地球固体圈层研究中也发挥着重要作用, 如地震、冰川均衡调整 (GIA)、地球流变性问题等 (Han et al., 2016; Panet et al., 2018; Peltier et al., 2015; Tesmer et al., 2011)。对于青藏高原区域, GRACE 观测的重力场背后信号源是更为复杂的, 因此, 基于 GRACE 重力数据开展青藏高原地壳变形研究也同样有着大量的前期工作需要完成, 包括低阶项系数替换、重力信号滤波处理、信号泄露恢复、非构造信号去除等。已有研究对这些前期工作有效的处理策略进行了详细介绍 (Landerer and Swenson, 2012; Swenson and Wahr, 2006; 汪秋昱等, 2022)。

3 青藏高原地壳隆升研究进展

基于 GNSS 与 GRACE 的联合研究, 从独特视角回答了青藏高原的地壳隆升动力学问题, 包括现今青藏高原整体的隆升速率是多少? 地壳是否处于增厚状态? 内部界面深度如何调整? 负荷变形与构造变形对地壳隆升的贡献如何区分? 当前青藏高原地壳隆升机制是什么? 因而综述前人这些成果将更有益于人们全面和深入地认知青藏高原地壳隆升。

3.1 地壳隆升的观测结果

青藏高原地壳隆升的 GNSS 研究是从区域变形观测开始的。例如, Xu 等 (2000) 基于青藏高原南

部 14 个移动 GNSS 台站 1993 年、1995 年、1997 年的观测资料首次尝试并初步给出了区域平均隆升速率为 16.2 ± 7.9 mm/a, 但这一结果受限于站点数目与观测时间长度等因素, 与后来众多结果不相符。随后, 刘经南等 (2000) 给出的西藏块体隆升速率大约为 3.6 ± 4.0 mm/a; 姜卫平等 (2008) 利用 1993 至 2002 年间 5 期观测资料获得了 15 个台站的垂向变形结果, 显示平均的台站隆升速率为 $3 \sim 5$ mm/a, 但同样受限于观测时间的连续性等因素, 不同期速率结果间存在一定差异。随着 GNSS 观测周期的加长, 一些研究采用单个或多个台站长期监测资料研究青藏高原的地壳隆升问题, 如 Sun 等 (2009) 基于拉萨、大理、昆明三个台站获得 1.2 ± 0.5 mm/a 的青藏高原地壳隆升速率; 邢乐林等 (2017) 基于 5 个基准站观测资料估算的青藏高原隆升速率为 1.94 ± 0.17 mm/a。随着观测时间的进一步延长, 区域变形研究得到进一步丰富, Fu 和 Freymueller (2012) 对尼泊尔喜马拉雅区域的长期 GNSS 垂直变形研究显示该区域的隆升有着强烈的季节性趋势特征, 台站的平均季节性隆升变化达到 $5 \sim 6$ cm, GNSS 台站区域的最大隆升速率为 6.07 mm/a, 喜马拉雅高山区整体处于显著的隆升状态; Hao 等 (2016) 针对高原东南区域的垂直 GNSS 变形研究表明该区域大部分位置处于隆升状态, 但川滇南部表现为下降趋势 ($1 \sim 2$ mm/a); Saji 等 (2020) 对喜马拉雅与北印度的地壳变形研究显示喜马拉雅前沿有着明显的沉降。此外, 地壳整体隆升速率还可以通过建立直立立方体模型, 通过地壳垂直运动与重力变化关系模型反演得到, 例如, 段虎荣等 (2011, 2020) 采用 GRACE 数据反演出沿喜马拉雅推覆构造带的区域平均隆升速率为 2.01 ± 0.87 mm/a。以上这些基于 GNSS 与 GRACE 的观测研究均显示青藏高原区域地壳有着毫米量级的垂向运动。

对于整个青藏高原, Liang 等 (2013) 基于 750 个台站资料首先完善地给出了地壳垂向运动结果, 喜马拉雅区域普遍表现出强烈的隆升, 与喜马拉雅山区南沿的差异达到 6 mm/a 以上; 青藏高原东部区域垂直变形差异大, 高原内、外围区域分别为相对隆升与下降; 青藏高原的中南部区域呈现出明显的下降状态, 平均速率在 $0 \sim -2$ mm/a。随后, Pan 等 (2018) 进一步利用 189 个 GNSS 连续台站和 933 个流动台站获取了青藏高原 1999—2016 年的三维地壳形变, 其结果显示在横跨整个青藏高原

的北北东走向上垂直变形速率由喜马拉雅区域的快速隆升 ($1\sim 5\text{ mm/a}$) 沿着主要断层逐渐减小; 青藏高原东北部一致的隆升速度约为 1.3 mm/a ; 青藏高原东南部由北至南地壳垂向变形状态由隆升转换为下降. 另外, 天山及周边区域也有着明显的隆升变形 ($1\sim 3\text{ mm/a}$), 对应着青藏高原北向伸展运动. 最近的更新结果有 Xiang 等 (2021)、Zhao 等 (2023), 使得青藏高原地壳垂向位移资料得到了

进一步丰富. 图 3a 为综合前人研究结果的青藏高原垂向变形速率场, 具体到相同站点的隆升数值, 不同结果间存在部分差异, 少数站点速率差值大于 3 mm/a (如图 3b), 这与不同研究的时间跨度、数据解算与误差处理方法等差异具有一定关系. 总体上, 这些研究揭示的青藏高原地壳隆升特征是一致的, 即现今的青藏高原仍“整体”处于隆升状态, 但空间差异显著.

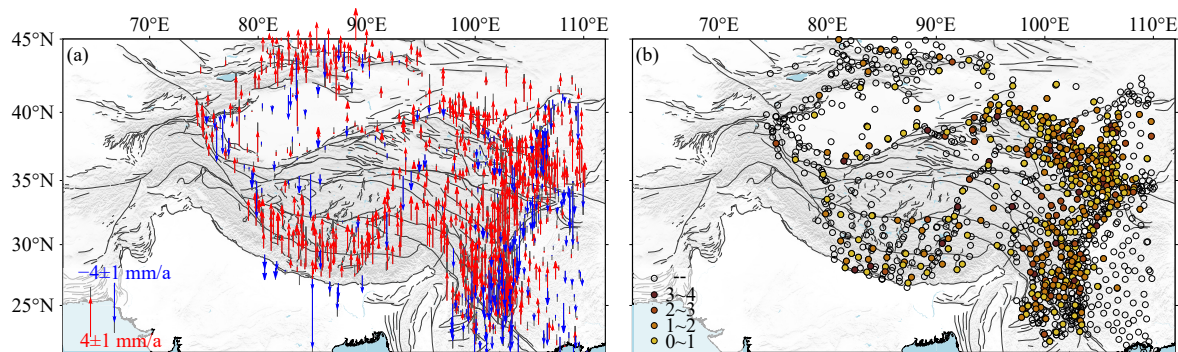


图 3 青藏高原及其周边垂向变形速率结果与不同研究间偏差. (a) 综合结果 (引自 Liang et al., 2013; Pan et al., 2018; Zhao et al., 2023); (b) 相同站点不同研究估算的速率的绝对差值, 单位为 mm/a , 空值表示缺少同一站点的结果比较

Fig. 3 Vertical deformation velocities and their differences in the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas. (a) Integrated results (from Liang et al., 2013; Pan et al., 2018; Zhao et al., 2023); (b) Absolute differences in rates estimated by different studies at the same sites, in units of mm/a . Blank values indicate a lack of comparisons for the same site's results

为了更好地呈现青藏高原地壳隆升空间特征, 一些研究通过对站点数据进行克里金插值、邻近点加权平均、顾及空间结构的中值滤波等 GNSS 成像方法获取垂向变形的空间网格结果, 以更好展示高原整体和区域隆升状态 (Pan et al., 2018, 2021; Xiang et al., 2021; Yi et al., 2016), 如图 4. 插值得到的青藏高原东南缘、中部及东北部区域的平均隆升速率在 $1\sim 3\text{ mm/a}$ 区间 (Jiao et al., 2019; Yi et al., 2016; Zhang et al., 2021), Rao 和 Sun (2021) 通过成像给出的整个青藏高原平均地壳隆升速率

为 $0.92\pm 0.22\text{ mm/a}$. 实际上, 现有的 GNSS 垂直变形资料仍然是不足的, 青藏高原中西部区域 (羌塘、可可西里等) 缺少台站观测, 而地质资料、构造活动性、地震应力分析 (孔屏和那春光, 2007; Lal et al., 2004; Xu and Zhao, 2009) 表明这些区域的变形活动是微弱的, 地壳更趋于平稳或沉降, 这与一些插值成像得到的明显隆升结果有一定差异. 因而, 精确的青藏高原平均隆升速率还需通过更丰富的观测资料来检验与计算得到. 特别是随着 InSAR 数据处理技术的成熟, 通过融合 InSAR 与 GNSS 技术,

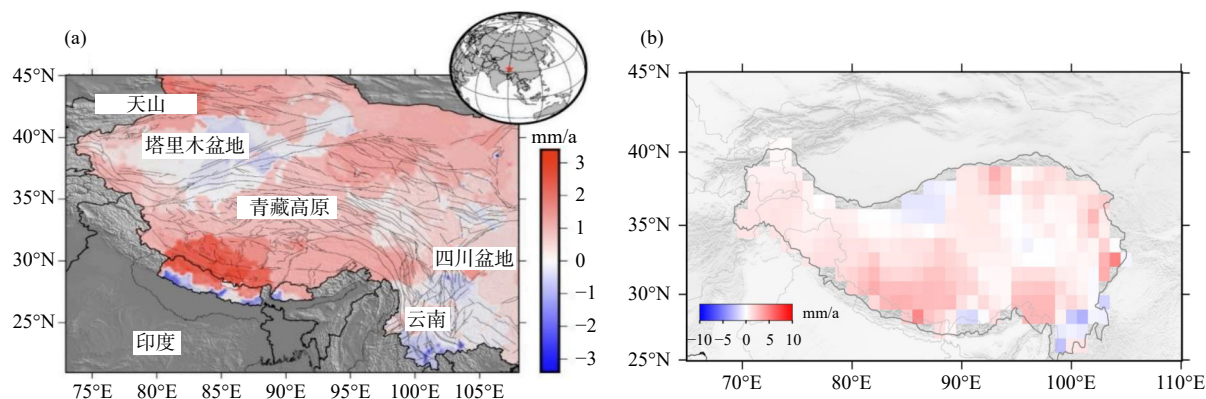


图 4 青藏高原垂向变形成像结果. (a, b) 分别引自 Xiang 等 (2021) 及 Rao 和 Sun (2021)

Fig. 4 GNSS imaging of vertical movement in the Qinghai-Xizang Plateau, and Fig. 4a and 4b are from Xiang et al. (2021) and Rao and Sun (2021), respectively

有望可以得到整个青藏高原区域的高空间分辨率形变场信息,从而弥补 GNSS 离散站点的观测不足问题(刘传金等, 2024)。

3.2 青藏高原 Moho 面深度调整反演

当前许多研究依据地球物理观测资料精确估算静态 Moho 面深度与形态结构 (Guy et al., 2017; Shin et al., 2015; Teng et al., 2014), 并产出许多静态的地球分层结构模型, 类如 LITHO1.0、CRUST1.0 等 (Laske et al., 2013; Pasyanos et al., 2014)。相较于传统地球物理方法, 卫星大地测量的 GNSS 与 GRACE 的时变场观测数据应用, 可以从动态变化角度研究高原 Moho 面深度的调整。Sun 等 (2009) 假设青藏高原是一个北侧固定的弹性块体, 在印度

板块的冲撞下发生变形, 壳幔物质运动, Moho 面深度发生调整。由于地壳和地幔物质的密度差异, 区域重力场变化, 所以通过将地表观测的重力变化扣除水文因素和地表隆升固体部分重力贡献, 得到反映内部物质迁移重力变化结果为 $-0.78 \pm 0.47 \mu\text{Gal/a}$, 对应着 Moho 面深度变化下壳幔物质调整的重力影响, 从而反演估算出青藏高原 Moho 面的下沉速度为 $2.3 \pm 1.3 \text{ cm/a}$ 。该研究提供了 Moho 面深度变化估算的思路, 那么联合 GRACE 与 GNSS 的青藏高原 Moho 面深度变化反演的原理与实现可以用图 5 流程图表示, 主要为对 GRACE 时变重力信号进行成分分离 (陆地各水文成分、沉积剥蚀、地表变形) 获取壳幔物质调整的重力变化影响与构建地壳运动模型, 解算 Moho 面深度变化速率。

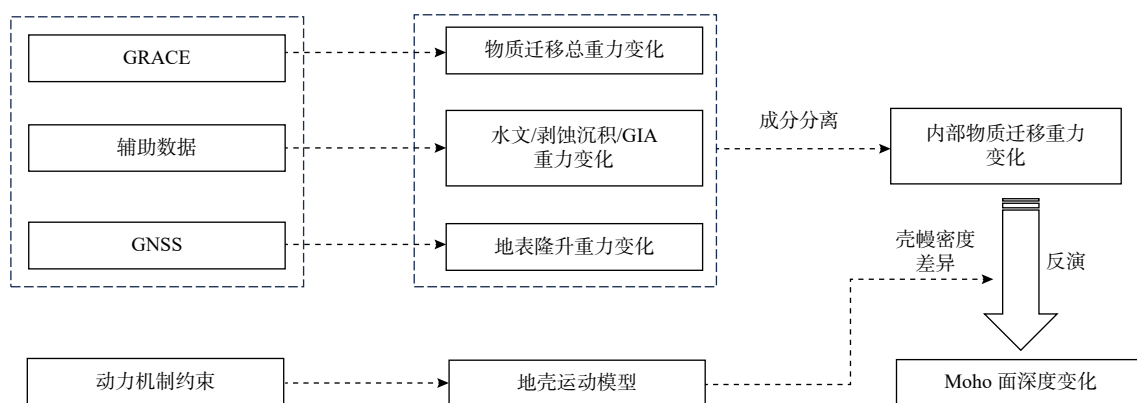


图 5 Moho 面深度变化反演方法

Fig. 5 Methodology for inverting Moho depth changes

随后, Yi 等 (2016) 在 Sun 等 (2009) 基础上使用 GRACE 数据在青藏高原东缘开展了研究, 去除其它因素影响, 构造运动重力变化结果为 $0.34 \pm 0.08 \mu\text{Gal/a}$ 。根据重力变化范围与 GNSS 速率不确定度, 依据地壳流模型与对流移除模型这两种适用的动力机制模型, 模拟计算得到了中下层地壳流动速度与上层地壳流动速度关系, 以及 Moho 面在深度方向的变化量, 具体数值结果如图 6 所示。邢乐林等 (2017) 联合绝对重力与 GRACE 重力反演得到青藏高原 Moho 面下沉下速率为 $2.35 \pm 3.30 \text{ mm/a}$, 另外, Jiao 等 (2019) 利用 GRACE 时变重力数据和水文资料估算了高原西部、中部和东部的三个区域 Moho 面深度变化的重力影响, 西部区域和东部区域的 Moho 面分别以 $18.1 \pm 7.2 \text{ mm/a}$ 和 $21.7 \pm 9.7 \text{ mm/a}$ 的速率上升, 而中部区域 Moho 面以 $18.3 \pm 8.6 \text{ mm/a}$ 的速率下降。同样, 区域 Moho 面深度变化研究还有 Zhang 等 (2021), 其获得的

青藏高原东北缘区域的 Moho 面深度变化速率为 $2.46 \pm 0.92 \text{ mm/a}$ 。对于整个青藏高原, Rao 和 Sun (2021) 基于 GRACE、GNSS 数据、卫星测高资料、沉积剥蚀资料等对青藏高原各水文与构造因素的重力影响进行了有效分离, 最终得到了整个青藏高原区域的 Moho 面深度变化空间分布, 如图 7。其结果显示以金沙缝合带划分的青藏高原南北部 Moho 面深度变化存在较大差异, 青藏高原北部 Moho 面处于明显的上升状态, 南部 Moho 面在下沉, 该空间分布与地震层析成像揭示的南北物质特性差异空间分布特征相符 (Chen et al., 2017)。

以上基于 GRACE 与 GNSS 的 Moho 面深度变化反演的数值结果都伴随着较大不确定度, 这主要是由 GRACE 观测中提取构造运动重力变化涉及到的多源信号分离、模型数据的可靠性与误差积累以及反演问题的多解性等决定的, 但体现了卫星大地测量技术在青藏高原动力学研究中的潜力与新颖

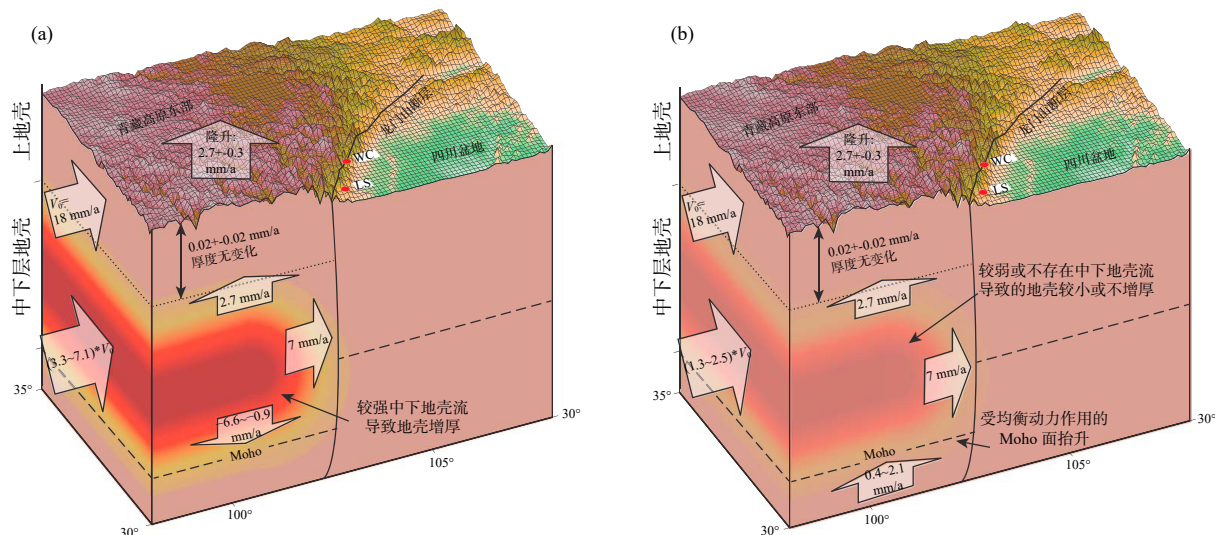


图 6 青藏高原东缘的两种可能模型的示意图. 在深部地壳流模型中 (a), 需要一个很强的中下地壳流来导致地壳增厚和地表隆升. 在深部地壳流和对流移除的混合模型中 (b), 地表隆升来自上升的 Moho 面和温和的中下地壳流 (引自 Yi et al., 2016). WC: 汶川地震; LS: 芦山地震

Fig. 6 Schematic diagram of two plausible models beneath the eastern Qinghai-Xizang Plateau. In the (a) deep crustal flow model, there is considerable flow of the middle-lower crust causing crustal thickening and surface uplift. In the (b) hybrid model of deep crustal flow and convective lithospheric detachment, the surface uplift is results from the uprising Moho and moderate middle-lower crust. The values are constrained by the space gravity and surface GPS observations, as well as a restriction of the Moho moving direction (from Yi et al., 2016)

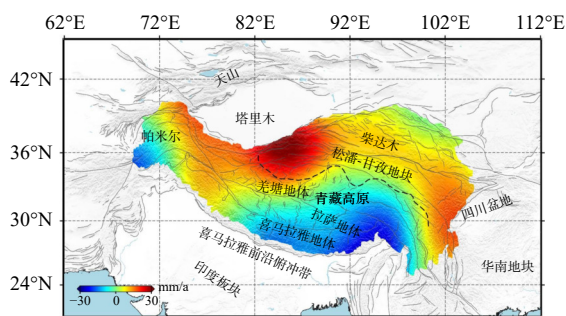


图 7 青藏高原 Moho 面深度变化反演结果. 黑色虚线表示划分的青藏高原南北分界线 (引自 Rao and Sun, 2021)

Fig. 7 Results of Moho depth changes inversion in the Qinghai-Xizang Plateau. The black dashed line represents the delineated boundary between the northern and southern Qinghai-Xizang Plateau (from Rao and Sun, 2021)

性. 同时, 我们从卫星观测的视角获取的青藏高原构造运动方面的新认识, 有望同基于地震学、大地电磁等地球物理方法和地质学等的成果提供的相关结果进行相互印证.

3.3 青藏高原地壳厚度调整

拥有巨厚地壳的青藏高原, GNSS 水平位移速度矢量由南向北具有线性变小特征, 反映了印度板块楔入欧亚大陆造成的地壳缩短增厚, 相关结论与认识被广泛接受 (Gan et al., 2007; Wang et al., 2001; Zhang et al., 2004). 青藏高原地壳厚度是由地表与 Moho 面共同界定的, 在上两节内容中, 基

于 GNSS 与 GRACE 的观测研究得到了青藏高原地表隆升与 Moho 面深度变化的定量结果. 因而, 综合以上研究结果, 青藏高原的地壳厚度调整状态将能够被有效确定.

Sun 等 (2009) 由三个 GNSS 台站观测与重力观测反演给出的青藏高原的地壳增厚速率为 24.2 mm/a. 刘杰等 (2015) 给出青藏高原南北部区域地壳增厚速率分别为 2.5 cm/a 和 0.2 cm/a. 邢乐林等 (2011, 2017) 反演得到了拉萨、阿拉善和祁连地块的地壳增厚结果, 分别给出的拉萨站点地壳增厚速率为 40.4 ± 3.30 mm/a、青藏高原地壳平均增厚速率为 4.29 ± 3.30 mm/a. 以上基于站点观测资料的研究大多表明了青藏高原地表有着小幅隆升, 但地壳的增厚幅度较大, Moho 面有着明显的沉降趋势. 这些研究均是依据极少数台站观测资料, 且站点多位于青藏高原南部、东部区域 (拉萨、昆明、大理、西宁), 因而不能够充分代表高原整体地壳厚度的调整状态. 随后, Yi 等 (2016) 基于更丰富的 GRACE 与 GNSS 空间观测资料开展了青藏高原东南缘动力学研究, 获取的地壳厚度调整区间为 $0.07 \sim 9.25$ mm/a, 揭示了区域的地壳增厚状态; Jiao 等 (2019) 给出的青藏高原内部三个区域的地壳增厚速率分别为 -16.9 ± 7.2 mm/a、 19.4 ± 8.6 mm/a、 -21.2 ± 9.7 mm/a, 表明了高原内部不同区域的地壳增厚状态的差异; Rao 和 Sun (2021, 2022) 对整个青藏高原地壳厚

度反演给出的减薄速率为 3.28 ± 5.13 mm/a, 其空间分布特征为青藏高原南北分别表现为普遍的地壳增厚与减薄, 最明显的区域地壳增厚与减薄均能达每年数十毫米; Zhang 等 (2021) 对青藏高原东北缘的构造研究给出的该区域平均地壳减薄速率为 0.56 ± 0.94 mm/a. 这些研究结果揭示了青藏高原地壳厚度调整状态的空间差异性与调整强度的多可能性, 例如区域的地壳增厚、显著增厚、地壳减薄、显著减薄等. 表 1 总结了前人研究给出的青藏高原地壳厚度变化结果与地壳厚度调整状态相关结论, 具体

数值代表不同研究给出的区域地壳隆升、增厚和 Moho 面深度变化的期望值. 需要指出的是, 在当前卫星或地表观测条件下, 地表隆升不确定度要整体低于其估算值, 因而不同研究给出的地表隆升状态的结论有着较高的可信度. 然而, Moho 面深度变化和地壳厚度调整结果有着很大的不确定度 (厘米量级), 甚至不确定度超过期望值, 一定程度上相关结果或结论的准确性是受到很大限制的, 虽表明了青藏高原动力学解释的复杂性与多可能性, 但值得后续研究的进一步验证.

表 1 青藏高原地壳厚度变化估算结果. 单位: mm/a

Table 1 Crustal thickness change of the Qinghai-Xizang Plateau. Unit: mm/a

地壳增厚速率	地表、Moho面深度调整	研究结果来源	解释
2.0~40.4	1.2~4.0, -39~0	刘杰等, 2015; Sun et al., 2009; 邢乐林等, 2011, 2017	站点区域地壳有着较大的增厚趋势
0.1~9.3	2.7, -6.6~2.6	Yi et al., 2016	地表隆升与区域地壳增厚幅值较小
-0.6	1.9, 2.5	Zhang et al., 2021	青藏高原东北缘地表隆升较为微弱, 地壳厚度有明显减薄
-3.3	0.9, 4.2	Rao and Sun, 2021, 2022	地表隆升较微弱, 青藏高原南北区域地壳分别有着显著增厚与减薄
-21.2~19.4	0.4~0.9, -21.7~18.3	Jiao et al., 2019	地表隆升较微弱, 区域地壳厚度存在相反的调整状态, 增厚与减薄幅度大

另一方面, 青藏高原地壳厚度调整状态的空间差异性与多可能性可以通过地壳物质平衡与地球物理、地球化学研究结果来验证分析. Westaway 等 (1995) 估算了印度板块碰撞挤压对青藏高原物质补充量约为 $1.9 \text{ km}^3/\text{a}$, 若这部分物质完全作用于地壳增厚隆升, 则对应着 0.6 mm/a 的青藏高原地壳增厚速率, 而这一数值要小于当前地表隆升观测结果. 因而, 青藏高原地壳隆升还可能受到岩石圈或更深层的抬升作用, 而地幔对流、岩石圈拆沉等这些深层动力过程更易使区域发生地壳减薄, Moho 面显著抬升. 另外, 整个印度—欧亚板块运动并不完全符合“整体刚性运动”特征 (Gan et al., 2007; Meade and Hager, 2001; Shen et al., 2005); 地球物理、地球化学研究揭示了青藏高原深层物质具有流变性与塑性特征 (Bai et al., 2010; Zhao et al., 2008), 表明印度板块地壳无法轻易实现整个地壳的俯冲下插. 岩石圈深部物质结构与热状态、均衡调整作用都会影响到青藏高原的隆升与地壳厚度调整 (单斌等, 2008). 因而, 这些观点在一定程度上支撑着基于 GNSS 与 GRACE 研究获取的青藏高原地壳厚度调整结果与结论的可靠性.

3.4 地壳隆升因素: 负荷变形、构造变形及其它因素

GNSS 与 GRACE 观测揭示了青藏高原的地壳隆升, 但背后隆升因素是复杂的, 除了板块碰撞下的构造运动外, 还包括气候环境影响的地表负荷变形、区域地震活动、全球尺度的冰川均衡调整等. 区分这些因素对高原地壳隆升的贡献, 是人们加深认知高原复杂动力系统的關鍵.

3.4.1 青藏高原负荷变形

在地表各质量源 (冰川、湖泊、沉积物等) 的加载和卸载作用下, 固体地球产生的不同时空尺度变形现象被称为负荷变形. 青藏高原由于其显著的水储量趋势性 (图 8a) 和季节性变化年幅值 (图 8b), 其伴随的负荷变形被广泛关注 (Argus et al., 2020; Fu and Freymueller, 2012; Hao et al., 2016; Khan et al., 2010; 唐河和孙文科, 2021; van Dam et al., 2007; White et al., 2022). 在计算实际地表负荷变形中, 学者们 (Farrell, 1972; Gilbert et al., 1968; Longman, 1962, 1963; Tang and Sun, 2019) 给出了基于数值积分求解分层弹性地球负荷变形

Green 函数的不同方法, 基于这些方法获取的 Green 函数可以用于计算任意质量分布下的全球任意区域的负荷变形, 其中, Farrell (1972) 的负荷理论最具代表性. 另外, 一些学者 (Guo et al., 2004; Mitrovica et al., 1994) 提出了从球谐谱域利

用 Love 数直接计算球面负荷变形的办法. 随着 GRACE 球谐系数产品的发布该方法成为当前的主流计算方法 (Ferreira et al., 2020; Fu and Freymueller, 2012; Pan et al., 2018; Saji et al., 2020).

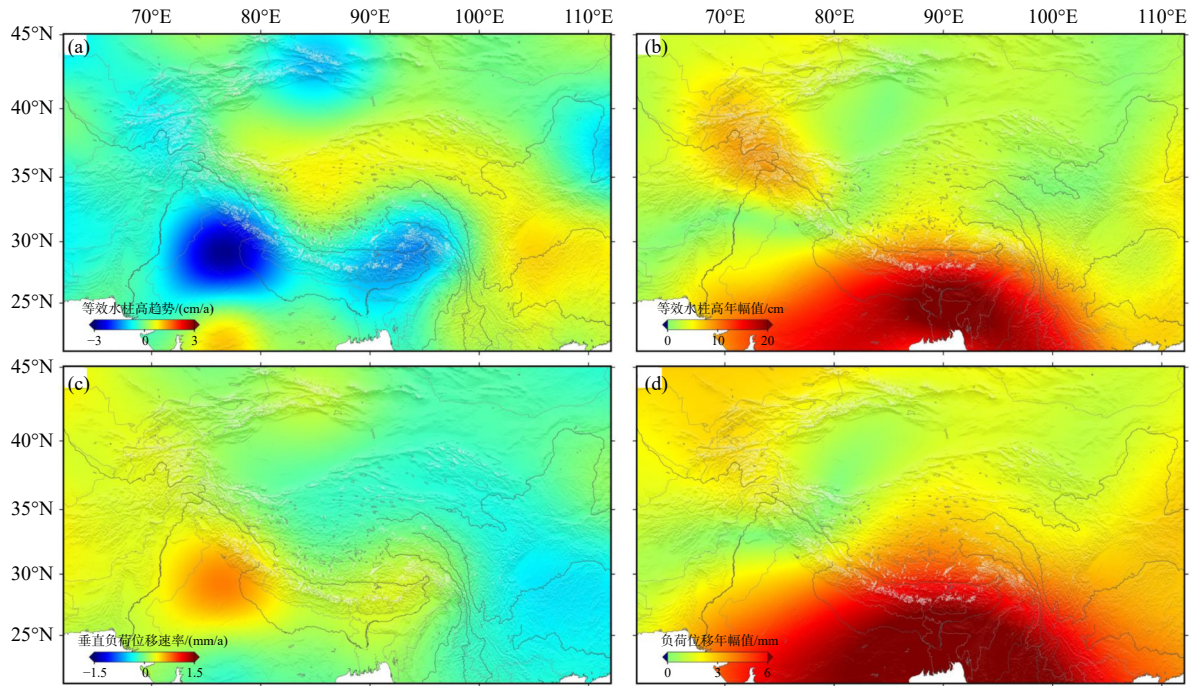


图 8 青藏高原水储量变化及垂向负荷变形影响. (a, b) 分别为以等效水柱高表示的陆地水储量变化的长期趋势、季节性年幅值; (c, d) 表示垂向负荷变形的趋势和年幅值

Fig. 8 Changes in water storage and vertical load deformation in the Qinghai-Xizang Plateau. (a, b) Show the long-term trends and seasonal annual amplitudes of changes in land water storage represented by equivalent water height, respectively. (c, d) Represent the trends and annual amplitudes of vertical load deformation

基于 Green 函数卷积计算地表垂向负荷变形与利用 GRACE 球谐系数及负荷 Love 数的负荷变形谱域计算, 分别可以通过公式 (1) 和 (2) 来实现:

$$U_{GF}(\theta, \phi) = \iint \Delta m(\theta', \phi') G_R(\Psi) \cos \theta' d\theta' d\phi' \quad (1)$$

$$U_{SH}(\theta, \phi) = R \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\sin \theta) \times [\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)] \times \frac{h_l'}{1 + k_l'} \quad (2)$$

其中, θ 和 ϕ 为观测点的纬度、经度, 公式 (1) 中 U_{GF} 是使用格林函数方法计算的观测点垂直负荷变形, Ψ 是负荷源 (θ', ϕ') 与观测点 (θ, ϕ) 之间的球面角距, Δm 表示负荷质量分布, $G_R(\Psi)$ 是垂直位移负荷格林函数; 公式 (2), U_{SH} 代表球谐计算得到的垂直负荷变形结果, R 是地球平均半径, $\bar{P}_{lm}$ 是完全正则化的勒让德多项式, h_l' 和 k_l' 是 l 阶的负荷 Love 数 (Farrell, 1972), ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} 为全球时变重力场中大地水准面球谐系数. 基于 GRACE CSR

球谐系数计算的垂向负荷变形趋势和季节性幅值分布如图 8c 和 8d, 显示了青藏高原显著的趋势性与季节性负荷变形影响.

Fu 和 Freymueller (2012) 基于 GRACE 数据估算了青藏高原尼泊尔区域的垂直负荷变形结果, 并与 GNSS 观测资料进行比较分析, 发现两者在季节性幅值与相位上有很好的 consistency. 同样, 青藏高原东南区域 GNSS 垂直位移也体现了强烈的季节性水文负荷特征 (Hao et al., 2016). 对于整个青藏高原区域, Pan 等 (2018) 利用十几年的 GRACE 数据估算了青藏高原区域垂直负荷变形的长期趋势, 并对 GNSS 垂直变形速率进行负荷改正. 图 9a 为估算的负荷变形趋势与 GNSS 垂直速率的百分比值. 相比于将 GRACE 观测量直接作为负荷质量结果估算负荷变形, Zhao 等 (2023) 采用来自于 NASA、GFZ 等机构发布的陆地水储量负荷、非潮汐海洋负荷、非潮汐大气压力负荷模型产品构建了区域地表

负荷场, 由此计算的垂向负荷变形速率与 GNSS 站点隆升速率比值关系如图 9b. 两种结果均表明, 负

荷效应对地壳变形有重大影响, 因而在区域构造变形研究中需有效去除负荷效应的影响.

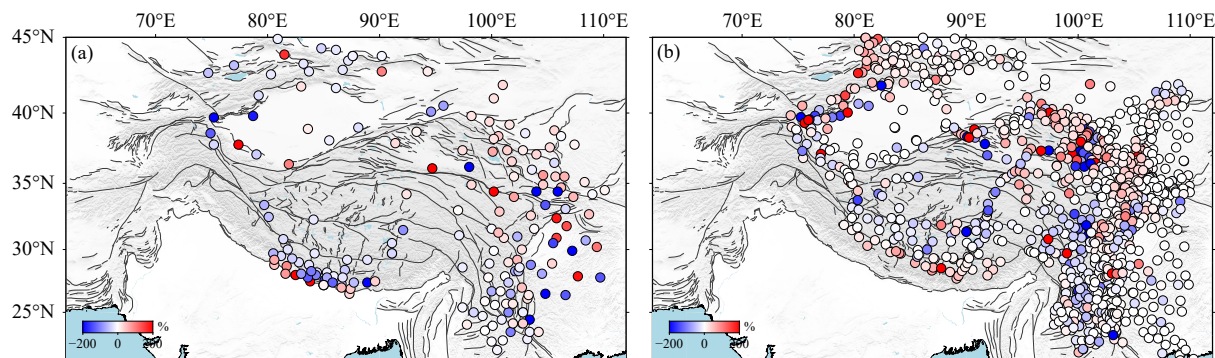


图 9 青藏高原垂直负荷变形趋势对 GNSS 站点地表隆升速率的影响. (a, b) 分别为基于 Pan 等 (2018) 和 Zhao 等 (2023) 的研究结果

Fig. 9 The contribution of vertical load deformation in the Qinghai-Xizang Plateau to surface uplift at GNSS stations. (a, b) Represent the research results based on Pan et al. (2018) and Zhao et al. (2023), respectively

对于利用 GRACE 球谐系数的谱域负荷变形计算方法, 需要指出的是, GRACE 观测的质量恢复体现的是中长波长的重力异常信息, 而 GNSS 观测包含了更高频的局部信息, 两者的频谱差异性以及 GRACE 综合重力场包含非负荷质量源信息, 因而决定了基于 GRACE 估算的负荷变形速率是存在不准性的 (Rao and Sun, 2022). 而对于一些负荷模型产品更关注于全球尺度季节性负荷效应, 更精细的局部负荷信息并不完整, 区域长期趋势性影响没有体现. 为了获得更精细有效的青藏高原负荷变形趋势性结果, Rao 和 Sun (2022) 基于高精度的全球和青藏高原区域水文观测资料、模型及前人研究成果构建的水文质量变化模型用以更好地代表真实负荷质量源. 由于基于 Love 数的谱域计算方法存在频谱截断的限制, 利用格林函数卷积计算方法重新估算了青藏高原区域垂直负荷变形趋势, 其结果显示 GRACE 获取的垂直负荷位移趋势在单站点能产生的最大偏差近 1 mm/a. 另外, 其结果得到青藏高原负荷变形的平均影响为 0.15 ± 0.12 mm/a, 对基于 GNSS 观测值估算的青藏高原平均隆升速率的贡献量为 16%. 以上研究表明负荷变形除了是导致青藏高原发生长期隆升变形的一个主要因素, 还决定了青藏高原地表季节性隆升与沉降运动. 负荷变形的准确模拟与计算是基于 GNSS 观测资料获取区域构造变形信息的重要前提与保证. 然而, 当前流行的基于 GRACE 数据的球谐谱域负荷变形估算方法, 其估算结果的准确性是存在较大问题的, 更高精度、可靠的负荷质量源模拟与格林函数积分方法更适用于 GNSS 站点的负荷变形计算 (Rao and Sun, 2022).

3.4.2 冰川均衡调整

冰川均衡调整是黏弹地球对末次冰期地表冰与海水负荷改变的动力学响应, 包括地壳变形、重力场变化、地球旋转运动等 (汪汉胜等, 2009). 许多学者基于长期大地测量观测资料、冰川历史记录和地球模型对冰川均衡调整的响应过程进行了模拟, 提出了适用于全球或区域的冰川均衡调整模型 (Geruo et al., 2013; Paulson et al., 2007; Peltier et al., 2015; Roy and Peltier, 2017). 冰川均衡调整对极地区域地壳垂向变形的影响较大, 能达到每年十几毫米. 在青藏高原区域, 基于不同冰川均衡调整模型的估算结果变形结果较一致, 对高原隆升的影响约为 0.34 mm/a. 此外, 一些研究根据青藏高原冰川遗迹与周边冰碛物分布推断青藏高原在更新世晚期存在统一的大冰盖, 但该结论存在着较大争论, 且可以确定青藏高原即使存在统一大冰盖, 该区域的冰后回弹也不会是青藏高原隆升的最主要机制 (Derbyshire et al., 1991; Kuhle, 1998; 汪汉胜等, 1997).

3.4.3 构造变形

印度欧亚板块碰撞被认为是青藏高原地壳隆升的重要构造动力来源, Westaway (1995) 对现今青藏高原地壳物质平衡进行了估算研究, 认为印度板块的碰撞对青藏高原物质补充量约 $4.4 \text{ km}^3/\text{a}$, 其中部分物质从喜马拉雅被剥蚀掉、部分地壳物质作用于青藏高原的伸展扩张、物质逃逸及被高原北部区域地壳运动吸收, 剩余约 43% 的地壳物质是贡献了青藏高原的地壳增厚与隆升 (图 10a).

若根据 Pan 等 (2018)、Wang 和 Shen (2020)

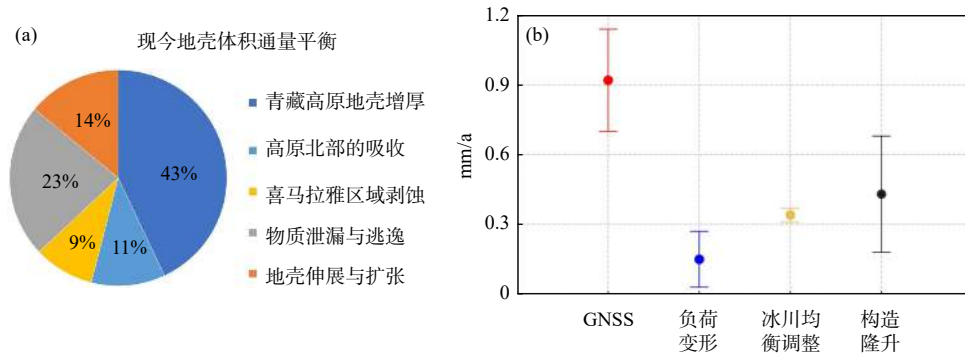


图 10 青藏高原地壳物质平衡 (a) 与地壳隆升各要素的贡献量 (b) (引自 Rao and Sun, 2021; Westaway, 1995)

Fig. 10 Crustal flux balance (a) and contribution of various factors to crustal uplift of the Qinghai-Xizang Plateau (b) (from Rao and Sun, 2021; Westaway, 1995)

等更新的 GNSS 水平位移场结果, 得到的印度板块北向俯冲速率要低于 Westaway (1995) 的 50 mm/a 预估量, 考虑相同的印度欧亚板块碰撞范围, 可以得到印度地壳碰撞的体积转换约为 $3 \text{ km}^3/\text{a}$. 同样的, 由于高原的伸展与物质逃逸, 地壳物质水平方向的“泄漏”也影响着青藏高原的地壳体积平衡. 其中, 青藏高原东南缘的地壳“逃逸”速率约为 13.4 mm/a, 我们假设的地壳物质运动通道宽度为 560 km, 该区域平均地壳厚度为 50 km, 那么青藏高原地壳物质由东南缘泄漏体积约为 $0.38 \text{ km}^3/\text{a}$. 另外, 青藏高原东部受到四川盆地阻挡作用, 青藏高原地壳物质向东移速率近乎于 0. 青藏高原东北部平均地表水平伸展速率约为 4.3 mm/a, 假设青藏高原东北缘的伸展区域由西祁连山至西秦岭构造带, 该区域平均地壳厚度约 50 km, 伸展区域长度为 1100 km, 那么该区域的地壳物质运动量约为 $0.24 \text{ km}^3/\text{a}$. 青藏高原北部由阿尔金断裂带往西至西昆仑断裂带至帕米尔高原整体向北移动速率约为 15 mm/a, 塔里木盆地对青藏高原地块移动的阻挡作用并没有像四川盆地那样强烈, GNSS 变形结果显示塔里木盆地区域存在一定的北向变形运动, 若将 GNSS 北向位移速率结果作为青藏高原北向伸展的地壳运动速率, 考虑运动区域长度为 1200 km, 地壳平均厚度 48 km, 则估算的体积通量为 $0.86 \text{ km}^3/\text{a}$. 由于青藏高原西部 GNSS 观测资料有限, 现有资料并未显示出青藏高原物质西向从帕米尔高原泄漏出去, 因此我们忽略掉青藏高原地壳物质西移“逃逸”的影响. 那么, 最终估算的青藏高原地壳伸展与“逃逸”造成的地壳物质流失总量为 $1.48 \text{ km}^3/\text{a}$, 那么剩余地壳体积变化总量约为 $1.52 \text{ km}^3/\text{a}$, 对应着 0.46 mm/a 的青藏高原地壳增厚速率.

另一方面, 从 GNSS 垂向变形监测获得的青藏

高原平均隆升速率 $0.92 \pm 0.22 \text{ mm/a}$ 中, 扣除全球冰川调整作用 (0.34 mm/a) 与水文负荷变形 (0.15 mm/a) 的贡献, 那么剩余的隆升速率为 0.43 mm/a 则为构造运动的贡献 (Rao and Sun, 2021), 图 10b 展示了青藏高原隆升的各影响因素贡献量. 这一构造隆升结果似乎与上文推算的印度板块碰撞增厚于青藏高原地壳的 0.46 mm/a 相一致. 实际上, 不同深度、区域地壳刚性强度、密度结构等物性差异在说明着青藏高原地壳运动存在的差异性与特殊性, 可能高原的上地壳以脆性变形为主, 黏滞性的下地壳和上地幔表现为流变特征 (吕庆田等, 1998; 张培震等, 2002). 因而, 本文上述粗略的估算和前人关于 Moho 面深度变化及地壳厚度反演都依赖较简单的地壳运动机制和模型, 虽整体揭示了青藏高原构造变形对青藏高原地壳隆升的重要影响, 但仍不足以精确量化青藏高原的构造隆升.

3.4.4 其它因素

除构造变形、负荷变形与冰川均衡调整外, 地表的剥蚀与沉积、地震活动等都在影响着高原的地形地貌, 同样也可以被认为是地壳变形的影响因素. 对于地震等自然灾害活动, 它们的空间区域性影响较强, 大地震的同震和震后变形影响已经在一些 GNSS 观测研究中被有效去除. 另外, 从大尺度讨论整个青藏高原的地壳变形问题, 我们也忽略掉了小区域环境因素的影响.

由于青藏高原河流众多, 季风环境复杂, 青藏高原区域的风化剥蚀与沉积现象显著. 剥蚀集中在喜马拉雅山脉和青藏高原东南缘 (Fielding, 1996), 约 $0.4 \text{ km}^3/\text{a}$ 的高原物质从喜马拉雅剥蚀掉并通过河流搬运至印度洋、恒河和雅鲁藏布江流域的平均剥蚀速率分别为 0.4 mm/a 和 0.1 mm/a (Westaway, 1995). 东南青藏高原和云南区域地表剥蚀面积

达到 106 km^2 , 其中黄河、长江、湄公河流域的地壳物质剥蚀沉积量为 $0.40 \text{ km}^3/\text{a}$ 、 $0.18 \text{ km}^3/\text{a}$ 、 $0.05 \text{ km}^3/\text{a}$, 怒江和伊洛瓦底江流域剥蚀量为 $0.10 \text{ km}^3/\text{a}$, 这些剥蚀沉积量对应着青藏高原东部和东南区域平均剥蚀速率约为 0.8 mm/a . 另外, 青藏高原及其周边的盆地区域同样有着明显的沉积作用, 最近的地质时期记录显示塔里木盆地西南部的最大沉积速率达到 0.43 mm/a , 而塔里木盆地北部的最大沉积速率为 0.27 mm/a (Métivier et al., 1999). 喜马拉雅前陆盆地的最大沉积速率为 0.5 mm/a (Westaway, 1995), 柴达木盆地作为高原内部盆地, 其物质沉积速率约为 0.41 mm/a (Métivier et al., 1998). 此外, 岩石裂变径迹记录、宇宙成因核素测年技术、河流沉积记录等对青藏高原的剥蚀沉积研究 (Clark et al., 2010; Duvall et al., 2012; Gabet et al., 2008; Garzanti et al., 2007; Henck et al., 2011), 均揭示了青藏高原的显著的剥蚀沉积. 总体上, 青藏高原的剥蚀物质流失主要发生在外流流域与高山区, 无论是在地质历史气候还是当前气候环境下, 青藏高原区域的剥蚀沉积作用主要是在削减与调整青藏高原的高程地貌.

在 3.4 节中本文综述了当前对青藏高原地壳隆升因素的研究进展. 负荷变形、构造变形、冰川均衡调整为主综合决定着青藏高原整体毫米量级的地

壳隆升现状. 亚洲水塔水储量的亏损与盈余空间特征对应的负荷变形贡献着青藏高原地壳的区域隆升与沉降, 全球冰川均衡调整促进了青藏高原的整体隆升, 另外, 剥蚀沉积作用对高原地壳变形的影响也较为可观, 但并未体现在 GNSS 观测量中, 而构造运动仍是使得青藏高原地壳隆升的最主要因素.

3.5 青藏高原隆升的动力机制分析

无论是青藏高原历史隆升还是现今隆升, 其背后的动力机制都尚未获得相关定论. 科学界认为的青藏高原变形动力包括印度板块向北的挤压应力、地幔流动对岩石圈底部施加的拖曳力、地幔热物质浮力、均衡调整动力等 (刘德民等, 2024). 地质、地球物理、地球化学等学科方法给出了相关动力机制模型, 如双层地壳模式 (Argand, 1924; Beghoul et al., 1993)、地壳通道流模式 (Royden et al., 1997)、地幔对流、岩石圈拆沉 (Houseman et al., 1981)、多因素驱动模式 (许志琴等, 1996). 这些主流的动力机制和运动模型虽很好地对区域或阶段地壳隆升有着合理的描述与论证, 但仍不足以充分准确地解释青藏高原的隆升与变形 (Ding et al., 2022; 朱介寿等, 2017). 在一些青藏高原地壳隆升的 GNSS 与 GRACE 观测研究中, 这些动力机制也被用于物理模型约束或结果结论的讨论分析 (如表 2).

表 2 青藏高原地壳隆升可能的动力机制

Table 2 The possible dynamic mechanisms for the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau's crust

动力机制	模型解释与地壳运动特征	应用与讨论分析
俯冲作用模式	印度板块俯冲下插, 地壳物质补充形成“双层地壳”, 地壳增厚与抬升	符合高原南部区域的显著地壳增厚 (Jiao et al., 2019; Rao and Sun, 2021; Wang et al., 2001; Zhang et al., 2004)
地壳通道流模式	深层物质解耦, 进行横向运动, 地壳厚度调整	青藏高原东南缘的区域性存在 (Gan et al., 2007; Yi et al., 2016)
地幔对流、岩石圈拆沉	上覆减薄的岩石圈受浮力作用向上抬升, 地壳整体隆升	青藏高原东北缘、北部区域的区域性存在 (Jiao et al., 2019; Rao and Sun, 2021; Zhang et al., 2021)
多因素驱动模式	综合运动机制, 地壳隆升与厚度调整	青藏高原物质运动的空间差异特征需综合机制来解释, 卫星大地测量研究暂未充分验证与讨论该模式

GNSS 观测资料描述了青藏高原地壳的基本运动学状态, 已初步形成连续变形的学术观点, 印度板块的俯冲、挤压作用促成了青藏高原地壳的缩短增厚 (Wang et al., 2001; Zhang et al., 2004). 另外, Gan 等 (2007) 发现青藏高原内部最显著的变形表现为绕喜马拉雅东构造结顺时针旋转的“冰川运动式”流滑带, 这一流滑带可以被认为是下地壳黏滞性通道流驱动上地壳高塑性物质动向逃逸的过程, 支持着区域地壳通道流的动力机制.

基于 GRACE 的青藏高原内部物质迁移研究也对相关的动力机制进行了有效应用与验证分析, Yi 等 (2016) 的青藏高原东南缘地壳厚度调整定量反演结果表明地幔对流引起的岩石圈拆沉模型和中下层地壳通道流模型能够对该区域的地壳运动现状进行较好的解释. Jiao 等 (2019) 给出的青藏高原中部不同区域 Moho 面隆升、沉降状态差异的结果也倾向于双层地壳与对流移除同时存在. Rao 和 Sun (2021) 给出的以印度板块碰撞前沿为界的青

藏高原南北区域地壳分别对应着显著增厚和减薄,与地震波速异常空间特征相符,且南部地壳增厚量与印度板块挤压补充量相一致的结果,表明青藏高原南部区域受到印度地壳的俯冲下插作用,达到双层地壳厚度,而青藏高原北部地壳在地幔对流作用下发生岩石圈减薄,双层地壳与地幔对流、岩石圈拆沉的综合变形机制可能更好地解释青藏高原当前的变形、隆升过程。Zhang 等 (2021) 的青藏高原东北缘地壳减薄与隆升结果,认为可能与地幔岩石圈对流移除后地壳均衡调整有关。这些利用卫星重力手段开展的青藏高原地壳隆升研究均是基于已被广泛认知和讨论的机制模型来开展的,获得的认识也较浅显,但揭示了青藏高原地壳隆升机制的复杂性,通过卫星大地测量技术对青藏高原全区域持续的观测与研究是未来我们更深入、更准确认识高原动力学问题的重要基础。

4 总结与展望

全面认知青藏高原地壳隆升问题是地球科学的愿景,也有着较大困难。卫星大地测量技术相对于其他方法手段具有明显的时空优势,因而从卫星大地测量这一视角认识青藏高原的地壳隆升是具有重要意义的。本文从青藏高原地壳隆升环境、地壳隆升的卫星观测、Moho 面深度变化的反演、整体地壳厚度的变化、各因素对地壳隆升的贡献及青藏高原地壳隆升动力机制这些内容进行了梳理,但青藏高原地壳隆升相关成果众多,因而本文可能不够系统详尽。通过总结本文的介绍与讨论,得到以下初步认知。

主要结论:GNSS 与 GRACE 在青藏高原动力学研究中具有巨大潜力与重要价值。两者的联合研究揭示了现今青藏高原地壳整体毫米量级的隆升现状,构造变形、负荷变形、冰川均衡调整等综合贡献着青藏高原的地壳隆升,青藏高原 Moho 面深度有着较大的调整且空间上存在差异,地壳并不处于一致的增厚状态,而且区域地壳厚度减薄是可能存在的,其背后的动力机制较为复杂。

存在问题:(1) 卫星大地测量观测资料仍然稀疏。GNSS 台站分布的不均匀性与有限观测时长限制了地表隆升估算结果的准确性;卫星重力涉及到的多源信号分离的复杂性及其低空间分辨率,致使地壳物质调整反演结果具有很大不确定性与无法反映出更局部信息。(2) 青藏高原大时空间尺度动

力学研究的困难性。青藏高原是由不同地体、不同构造区、不同水文流域组成,不同区域的差异性在卫星观测的动力学研究中并未作有效区分与充分考虑。高原的形成、生长与演化持续的几十个百万年,当前卫星观测资料能否有效验证青藏高原地球动力作用的长期稳定性。(3) 卫星观测视角的动力学研究仍是基于已有的机制模型来开展应用分析的,在相关研究中并未对不同机制模型进行充分比较、验证及融合。

解决方案:目前卫星大地测量技术对青藏高原动力学研究是尝试和开始,为解决以上问题,更好地认识青藏高原地壳隆升问题,更持续的观测与更全面的关注是基础,准确有效的多源资料融合与综合信号分离是关键,多学科方法的综合研究和约束是重点。因此,需有效提升青藏高原区域的观测时空精度和延长及扩大观测周期,包括融合下一代卫星观测资料、国内外已开展的横跨青藏高原的地表重力观测任务资料以及将来的 MEMS 重力观测资料,和实现 GNSS+InSAR 的高精度、长时间跨度的三维形变观测;加强物理建模及数据处理方法的研究,尤其是信号成分分离与反演方法的创新与进步;进行有效准确的多源数据应用与融合,提供更多的物理和数学约束;青藏高原地壳隆升是涉及到整个地球科学各分支学科的重大研究课题,只有多学科交叉融合才能得到更合理的创新性进步与认知。

未来展望:青藏高原是亚洲高山区的核心区域,天山、帕米尔高原等都是亚洲高山区的重要组成部分,这些区域的地壳运动与青藏高原地壳隆升过程密切相关,未来将青藏高原的动力学研究拓展到整个亚洲高山区,对深度认识板块碰撞和全球气候变化下青藏高原动力学问题大有益处。随着卫星监测技术的快速发展,地壳变形、重力场变化监测资料将更加丰富,水文模型、地质资料等将不断精细与可靠,多学科方法交叉融合是未来科学研究创新发展的趋势。因此,相信未来基于丰富可靠的资料,在学者们不断努力下,人类对青藏高原深入认识面临的巨大阻碍将不断被清除。最终,青藏高原研究将成为人类对地球科学认识的宝库。

致谢

感谢三位审稿专家与期刊编辑的建设性指导与宝贵修改意见。

References

- Amin H, Bagherbandi M, Sjöberg L E. 2020. Quantifying barystatic sea-level change from satellite altimetry, GRACE and Argo observations over 2005–2016[J]. *Advances in Space Research*, 65(8): 1922–1940.
- Argand E. 1924. La tectonique de l'Asie[C]// 13th International Geological Congress Report Session, 1: 171–372.
- Argus D F, Ratliff B, DeMets C, et al. 2020. Rise of Great Lakes surface water, sinking of the upper Midwest of the United States, and viscous collapse of the forebulge of the former Laurentide ice sheet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(9): e2020JB019739.
- Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Nature Geoscience*, 3(5): 1–5.
- Bao X, Song X, Eaton D W, et al. 2020. Episodic lithospheric deformation in eastern Tibet inferred from seismic anisotropy[J]. *Geophysical Research Letters*, 47(3): e2019GL085721
- Beghoul N, Barazangi M, Isacks B L. 1993. Lithospheric structure of Tibet and western North America: Mechanisms of uplift and a comparative study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 98: 1997–2016.
- Bendick R, Bilham R, Freymueller J T, et al. 2000. Geodetic evidence for a low slip rate in the Altyn Tagh fault system[J]. *Nature*, 404: 69–72.
- Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. 2006. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numeric weather model data[J]. *Geophysical Research Letters*, 33: L07304.
- Chambers D P, Wahr J, Nerem R S. 2004. Preliminary observations of global ocean mass variations with GRACE[J]. *Geophysical Research Letters*, 31: L13310.
- Chang L, Sun W K. 2021. Progress and prospect of sea level changes of global and China nearby seas[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(3): 266–279 (in Chinese).
- Chen J L, Cazenave A, Dahle C, et al. 2022. Applications and challenges of GRACE and GRACE Follow-On satellite gravimetry[J]. *Surveys in Geophysics*, 43(8): 1–41.
- Chen L, Wang X, Wang X, et al. 2022. Advances and perspectives for receiver function imaging of the Earth's internal discontinuities and velocity structures[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 53(6): 680–701 (in Chinese).
- Chen M, Niu F, Tromp J, et al. 2017. Lithospheric foundering and underthrusting imaged beneath Tibet[J]. *Nature Communications*, 8(1): 15659.
- Clark M K, Farley K A, Zheng D W, et al. 2010. Early Cenozoic faulting of the northern Tibetan Plateau margin from apatite (U–Th)/He ages[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(1): 78–88.
- Cui P, Jia Y, Su F H, et al. 2017. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for future research[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(9): 985–992 (in Chinese).
- Dang Y M, Jiang T, Yang Y X, et al. 2003. Research progress of geodesy in China (2019–2023)[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(9): 1419–1436 (in Chinese).
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. 2002. Basic characteristics of active tectonics of China[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 32(12): 1020–1030 (in Chinese).
- Derbyshire E Y, Shi J, Li B, et al. 1991. Quaternary glaciation of Tibet: The geological evidence[J]. *Quaternary Science Reviews*, 10: 485–510.
- Ding L, Kapp P, Cai F, et al. 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3: 652–667.
- Dong D N, Fang P, Bock Y, et al. 2002. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS derived site position time series[J]. *Journal of Geophysical Research*, 107: 901–916.
- Duan A M, Wu G X. 2005. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate pattern over subtropical Asia[J]. *Climate Dynamics*, 24(7): 793–807.
- Duan H R, Zhang Y Z, Xu H J, et al. 2011. Crustal horizontal movement velocity in west China inverted by satellite gravity data[J]. *Journal of Seismological Research*, 34(3): 344–349 (in Chinese).
- Duan H R, Kang M Z, Wu S Y, et al. 2020. Uplift rate of the Tibetan Plateau constrained by GRACE time-variable gravity field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(12): 4345–4360 (in Chinese).
- Duvall A R, Clark M K, Avdeev B, et al. 2012. Widespread late Cenozoic increase in erosion rates across the interior of eastern Tibet constrained by detrital low-temperature thermochronometry[J]. *Tectonics*, 31(3): TC3014.
- Farrell W E. 1972. Deformation of the Earth by surface loads[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10(3): 761–797.
- Feng W, Zhong M, Lemoine J M, et al. 2013. Evaluation of groundwater depletion in North China using the gravity recovery and climate experiment (GRACE) data and ground-based measurements[J]. *Water Resource Research*, 49: 2110–2118.
- Ferreira V G, Liu Z, Montecino H C, et al. 2020. Reciprocal comparison of geodetically sensed and modeled vertical hydrological loading products[J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 55(1): 23–49.
- Fielding E J. 1996. Tibet uplift and erosion[J]. *Tectonophysics*, 260 (1–3): 55–84.
- Fu Y M, Freymueller J T. 2012. Seasonal and long-term vertical deformation in the Nepal Himalaya constrained by GPS and GRACE measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B3): B03407.
- Gabet E J, Burbank D W, Pratt S B, et al. 2008. Modern erosion rates in the high Himalayas of Nepal[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 267(3): 482–494.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 112: 1–14.
- Gan W J. 2021. Progress and prospect on GPS observation technology of crustal movement in China[J]. *City and Disaster Reduction*, 2021(4): 39–44 (in Chinese).
- Garzanti E, Vezzoli G, Andò S, et al. 2007. Quantifying sand provenance and erosion (Marsyandi River, Nepal Himalaya)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(3): 500–515.
- Geruo A, Wahr J, Zhong S. 2013. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: An application to glacial isostatic adjustment in Antarctica and Canada[J]. *Geophysical Journal International*, 192(2): 557–572.
- Gilbert F, Backus G, Herrmann G. 1968. Elastic-gravitational vibrations of a radially stratified sphere[J]. *Dynamics of Stratified Solids*, 1968: 82–95.
- Guo J, Li Y, Huang Y, et al. 2004. Green's function of the deformation

- of the Earth as a result of atmospheric loading[J]. *Geophysical Journal International*, 159(1): 53-68.
- Guy A, Holzrichter N, Ebbing J. 2017. Moho depth model for the Central Asian Orogenic Belt from satellite gravity gradients[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122: 7388-7407.
- Han S C, Sauber J, Pollitz F. 2016. Postseismic gravity change after the 2006–2007 great earthquake doublet and constraints on the asthenosphere structure in the central Kuril Islands[J]. *Geophysical Research Letters*, 43: 3169-3177.
- Hao M, Freymueller J T, Wang Q, et al. 2016. Vertical crustal movement around the southeastern Tibetan Plateau constrained by GPS and GRACE data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 437: 1-8.
- Henck A C, Huntington K W, Stone J O, et al. 2011. Spatial controls on erosion in the Three Rivers Region, southeastern Tibet and southwestern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(1): 71-83.
- Herman F, Copeland P, Avouac J P, et al. 2010. Exhumation, crustal deformation, and thermal structure of the Nepal Himalaya derived from the inversion of thermochronological and thermobarometric data and modeling of the topography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115: B06407.
- Houseman G A, McKenzie D P, Molnar P. 1981. Convective instability of a thickened boundary layer and its relevance for the thermal evolution of continental convergent belts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 86: 6115-6132.
- Jackson M, Bilham R. 1994. Constraints on Himalayan deformation inferred from vertical velocity fields in Nepal and Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 99: 13897-13912.
- Jiang W P, Zhou X H, Liu J N, et al. 2008. Present-day crustal movement and strain rate in the Qinghai-Tibetan Plateau from GPS data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 37(3): 285-292 (in Chinese).
- Jiang W P, Wang K H, Li Z, et al. 2018. Prospect and theory of GNSS coordinate time series analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 2112-2123 (in Chinese).
- Jiao J S, Zhang Y Z, Yin P, et al. 2019. Changing Moho beneath the Tibetan Plateau revealed by GRACE observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(6): 5907-5923.
- Khan S A, Wahr J, Bevis M, et al. 2010. Spread of ice mass loss into northwest Greenland observed by GRACE and GPS[J]. *Geophysical Research Letters*, 37: L06501.
- Kong P, Na C G. 2007. Erosion and uplift of Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 27(1): 1-5 (in Chinese).
- Kuhle M. 1998. Reconstruction of the 2.4 million km² late Pleistocene ice sheet on the Tibetan Plateau and its impact on the global climate[J]. *Quaternary International*, 46: 71-108.
- Kusche J, Schrama E J O. 2005. Surface mass redistribution inversion from global GPS deformation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) gravity data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110: B09409.
- Lal D D, Harris N, Sharma K K, et al. 2004. Erosion history of the Tibetan Plateau since the last interglacial: Constraints from the first studies of cosmogenic ¹⁰Be from Tibetan bedrock[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1): 33-42.
- Landerer F W, Swenson S C. 2012. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates[J]. *Water Resources Research*, 48: W04531.
- Laske G, Masters G, Ma Z, et al. 2013. Update on CRUST1.0-A 1-degree global model of Earth's crust[C]// EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Li J J, Wen S X, Zhang Q S. 1979. A discussion on the period, amplitude and type of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Scientia Sinica*, 6: 608-616 (in Chinese).
- Liang S M, Gan W J, Shen C, et al. 2013. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(10): 5722-5732.
- Liu C J, Ji L Y, Zhu L Y, et al. 2024. Kilometer-resolution three-dimensional crustal deformation of Tibetan Plateau from InSAR and GNSS[J]. *Science China Earth Sciences*, 67(6): 1818-1835 (in Chinese).
- Liu D M, Wang J, Jiang H, et al. 2024. Evolutionary geodynamics and remote effects of the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 31(1): 154-169 (in Chinese).
- Liu J, Fang J, Li H L, et al. 2015. Secular variation of gravity anomalies within the Tibetan Plateau derived from GRACE data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(10): 3496-3506 (in Chinese).
- Liu J N, Xu C J, Song C H, et al. 1998. Study of the crustal movement in the middle east region of Qinghai-Xizang Plateau with GPS measurements[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 41(4): 518-524 (in Chinese).
- Liu J N, Xu C J, Song C H, et al. 2000. The multi-epoch re-survey study of the present-day crustal movement and strain in the Tibetan Plateau using precise global satellite positioning systems[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(24): 2658-2663 (in Chinese).
- Longman I M. 1962. A Green's function for determining the deformation of the Earth under surface mass loads: 1. Theory[J]. *Journal of Geophysical Research*, 67(2): 845-850.
- Longman I M. 1963. A Green's function for determining the deformation of the Earth under surface mass loads: 2. Computations and numerical results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 68(2): 485-496.
- Lü Q T, Jiang M, Ma K Y, et al. 1998. Study on the lithosphere structure, deformation and geodynamics with natural earthquakes in central Tibetan Plateau[J]. *Earth Science*, 23(1): 26-31 (in Chinese).
- Ma R H, Duan H T, Hu C M, et al. 2010. A half-century of changes in China's lakes: Global warming or human influence?[J]. *Geophysical Research Letters*, 37(24): L24106.
- Meade B J, Hager B H. 2001. The current distribution of deformation in the Western Tien Shan from block models constrained by geodetic data[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 42(10): 1622-1633.
- Métivier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. 1998. Northeastward growth of the Tibet Plateau deduced from balanced reconstruction of two depositional areas: The Qaidam and Hexi Corridor basins, China[J]. *Tectonics*, 17(6): 823-842.
- Métivier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. 1999. Mass accumulation rates in Asia during the Cenozoic[J]. *Geophysical Journal International*, 137(2): 280-318.
- Mitrovica J, Davis J, Shapiro I. 1994. A spectral formalism for computing three-dimensional deformations due to surface loads: 1. The-

- ory[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B4): 7057-7073.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision[J]. *Science*, 189(4201): 419-426.
- Pan Y J, Shen W B, Shum C K, et al. 2018. Spatially varying surface seasonal oscillations and 3-D crustal deformation of the Tibetan Plateau derived from GPS and GRACE data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 502: 12-22.
- Pan Y J, Hammond W C, Ding H, et al. 2021. GPS imaging of vertical bedrock displacements: Quantification of two-dimensional vertical crustal deformation in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126: e2020JB020951.
- Panet I, Bonvalot S, Narteau C, et al. 2018. Migrating pattern of deformation prior to the Tohoku-Oki earthquake revealed by GRACE data[J]. *Nature Geoscience*, 11(5): 367-373.
- Pasyanos M E, Masters T G, Laske G, et al. 2014. LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3): 2153-2173.
- Paulson A, Zhong S, Wahr J. 2007. Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data[J]. *Geophysical Journal International*, 171(2): 497-508.
- Peltier W, Argus D, Drummond R. 2015. Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE6G_C (VM5a) model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120: 450-487.
- Rao W L, Sun W K. 2021. Moho interface changes beneath the Tibetan Plateau based on GRACE data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(2): e2020JB020605.
- Rao W L, Sun W K. 2022. Uplift of the Tibetan Plateau: How to accurately compute the hydrological load effect[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127: e2021JB022475.
- Rowley D B, Currie B S. 2006. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet[J]. *Nature*, 439: 677-681.
- Roy K, Peltier W. 2017. Space-geodetic and water level gauge constraints on continental uplift and tilting over North America: Regional convergence of the ICE-6G_C (VM5a/VM6) models[J]. *Geophysical Journal International*, 210(2): 1115-1142.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. *Science*, 276: 788-790.
- Royden L H, Burchfiel B C, Van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 321: 1054-1058.
- Saji A P, Sunil P S, Sreejith K M, et al. 2020. Surface deformation and influence of hydrological mass over Himalaya and north India revealed from a decade of continuous GPS and GRACE observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(1): e2018JF004943.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. 2008. Analysis of the thermal structure of lithospheric mantle and lithospheric isostasy in China continent[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(4): 1058-1065 (in Chinese).
- Shen Z K, Lv J, Wang M, et al. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110: B11409.
- Shin Y, Shum C, Braitenberg C, et al. 2015. Moho topography, ranges and folds of Tibet by analysis of global gravity models and GOCE data[J]. *Scientific Reports*, 5: 11681.
- Styron R, Taylor M, Okoronkwo M. 2010. Database of active structures from the Indo-Asian collision[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 91(20): 181-182.
- Sun W K. 2002. Satellite in low orbit (CHAMP, GRACE, GOCE) and high precision earth gravity field: The latest progress of satellite gravity geodesy and its great influence on geoscience[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 22(1): 92-100 (in Chinese).
- Sun W K, Wang Q, Li H, et al. 2009. Gravity and GPS measurements reveal mass loss beneath the Tibetan Plateau: Geodetic evidence of increasing crustal thickness[J]. *Geophysical Research Letters*, 36: L02303.
- Swenson S, Wahr J. 2006. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data[J]. *Geophysical Research Letters*, 33: L8402.
- Tang H, Sun W K. 2019. New method for computing post-seismic deformations in a realistic gravitational viscoelastic Earth model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(5): 5060-5080.
- Tang H, Sun W K. 2021. Progress and prospect of deformation theory in the viscoelastic earth[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(1): 11-26 (in Chinese).
- Tapley B D, Watkins M M, Flechtner F, et al. 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change[J]. *Nature Climate Change*, 9: 358-369.
- Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294: 419-426.
- Teng J, Deng Y, Badal J, et al. 2014. Moho depth, seismicity and seismogenic structure in China mainland[J]. *Tectonophysics*, 627: 108-121.
- Tesmer V P, Steigenberger T, van Dam T, et al. 2011. Vertical deformations from homogeneously processed GRACE and global GPS long-term series[J]. *Journal of Geodesy*, 85: 291-310.
- Tregoning P, Watson C. 2009. Atmospheric effects and spurious signals in GPS analyses[J]. *Journal of Geophysical Research*, 114: B09403.
- van Dam T, Wahr J, Lavallée D. 2007. A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B3): B03404.
- Wang H S, Xu H Z, Li G Y. 1997. The isostatic effect of late Pleistocene glaciers on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 26(2): 56-62 (in Chinese).
- Wang H S, Wu P, Xu H Z. 2009. A review of research in glacial isostatic adjustment[J]. *Progress in Geophysics*, 24(6): 1958-1967 (in Chinese).
- Wang M, Shen Z K, Dong D N. 2005. Effects of non-tectonic crustal deformation on continuous GPS position time series and correction to them[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(5): 1045-1052 (in Chinese).
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125: e2019JB018774.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day tectonic deformation in continental China: Thirty years of GPS observation and research[J]. *Earthquake Research in China*, 36(4): 660-683 (in Chinese).
- Wang Q, You X Z, Wang Q L. 1996. The determination of Qinghai-

- Xizang (Tibet) Plateau using global positioning system[J]. *Seismology and Geology*, 18: 97-103 (in Chinese).
- Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. *Science*, 294: 574-577.
- Wang Q. 2003. Research on the current crustal movement in mainland China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 25: 541-547 (in Chinese).
- Wang Q Y, Rao W L, Zhang L, et al. 2022. Progress and prospect of GRACE time-varying gravity signal inversion method[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 50(9): 104-116 (in Chinese).
- Watson C, Tregoning P, Coleman R. 2006. Impact of solid Earth tide models on GPS coordinate and tropospheric time series[J]. *Geophysical Research Letters*, 33: L08306.
- Westaway R. 1995. Crustal volume balance during the India-Eurasia collision and altitude of the Tibetan Plateau: A working hypothesis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100(B8): 15173-15192.
- White A M, Gardner W P, Borsa A A, et al. 2022. A review of GNSS/GPS in hydrogeodesy: Hydrologic loading applications and their implications for water resource research[J]. *Water Resources Research*, 58: e2022WR032078.
- Wu Y Q, Zheng Z, Nie J, et al. 2022. High-precision vertical movement and three-dimensional deformation pattern of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127: e2021JB023202.
- Xiang Y F, Wang H, Chen Y Y, et al. 2021. GNSS imaging of strain rate changes and vertical crustal motions over the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 13 (23): 4937.
- Xing L L, Sun W K, Li H, et al. 2011. Present-day crust thickness increasing beneath the Qinghai-Tibetan Plateau by using geodetic data at Lhasa station[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 40(1): 41-44 (in Chinese).
- Xing L L, Wang L H, Hu M Z, et al. 2017. Time-varying gravity measurements determine the crustal uplift and thickening rate of the Tibetan Plateau[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(5): 569-574 (in Chinese).
- Xu C J, Liu J N, Song C H, et al. 2000. GPS measurements of present-day uplift in the Southern Tibet[J]. *Earth, Planets and Space*, 52: 735-739.
- Xu H Z, Zhou X H, Peng B B. 2005. Satellite gravity measurement[J]. *Geospatial Information*, 3(1): 1-3 (in Chinese).
- Xu J, Zhao Z X. 2009. Extensional seismogenic stress and tectonic movement on the central region of the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Geophysics*, 9: 897424.
- Xu Z Q, Jiang M, Yang J S. 1996. Tectonophysical process at depth for the uplift of the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 195-206 (in Chinese).
- Xu Z Q, Yang J S, Jiang M, et al. 1999. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 139-152 (in Chinese).
- Xu Z Q, Jiang M, Yang J S, et al. 2004. Mantle structure of Qinghai-Tibet Plateau: Mantle plume, mantle shear zone and delamination of lithospheric slab[J]. *Earth Science Frontiers*, 11: 329-343 (in Chinese).
- Yang Y, Ritzwoller M H, Zheng Y, et al. 2012. A synoptic view of the distribution and connectivity of the mid-crustal low velocity zone beneath Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117: B04303.
- Yao T D. 2019. A comprehensive study of Water-Ecosystem-Human activities reveals unbalancing Asian Water Towe and accompanying potential risks[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(27): 2761-2762 (in Chinese).
- Yao T D, Xue Y, Chen D, et al. 2019. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3): 423-444.
- Yi S, Sun W K. 2014. Evaluation of glacier changes in high-mountain Asia based on 10 year GRACE RL05 models[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3): 2013JB010860.
- Yi S, Freymueller J T, Sun W K. 2016. How fast is the middle-lower crust flowing in eastern Tibet? A constraint from geodetic observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121: 6903-6915.
- Yin A, Harrison T M. 2003. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280.
- Ying S F, Zhang Z S, Geng S C, et al. 1988. Basic characteristics of recent vertical crustal movement of China mainland[J]. *Earthquake Research in China*, 4: 3-10.
- You X Z, Du R L, Wang Q, et al. 2001. GPS results of current crustal movement of China continent and primary analysis[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 21(8): 1-8 (in Chinese).
- Zhan J G, Shi H L, Wang Y, et al. 2017. Complex principal component analysis of mass balance changes on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 11(3): 1487-1499.
- Zhang G Q, Chen W F, Xie H J. 2019. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and landsat missions[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 13107-13118.
- Zhang G Q, Wen B S, Fu G Y, et al. 2021. Moho changes beneath the northeastern Tibetan Plateau revealed by multiple geodetic datasets[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126: e2021JB022060.
- Zhang L, Sun W K. 2022. Progress and prospect of GRACE Mascon product and its application[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 53(1): 35-52 (in Chinese).
- Zhang P Z, Ma Q, Ma Z J. 2002. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 442-450 (in Chinese).
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System data[J]. *Geology*, 32: 809-812.
- Zhang P Z, Wang W T, Gan W J, et al. 2022. Present-day deformation and geodynamic process of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(10): 3297-3313 (in Chinese).
- Zhao G Z, Chen X B, Wang L F, et al. 2008. Evidence of crustal 'channel flow' in the eastern margin of Tibetan plateau from MT measurements[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(12): 1887-1893.
- Zhao Q, Chen Q, van Dam T, et al. 2023. The vertical velocity field of the Tibetan Plateau and its surrounding areas derived from GPS

- and surface mass loading models[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 609: 118107.
- Zhong D L, Ding L. 1996. Discussion on the uplift process and mechanism of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 26(4): 289-295 (in Chinese).
- Zhou X J, Zhao P, Chen J M, et al. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 11: 1473-1486.
- Zhu J S, Wang X B, Yang Y H, et al. 2017. The crustal flow beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its process of dynamics[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(6): 2038-2057 (in Chinese).
- Zhu W Y, Cheng Z Y, Wang X Y, et al. 1998. Quantitative analysis of the crustal motion of the Tibet Plateau determined by GPS[J]. *Chinese Journal of Nature*, 20(6): 363 (in Chinese). DOI: CNKI: SUN: ZRZZ.0.1998-06-019.
- ### 附中文参考文献
- 常乐, 孙文科. 2021. 全球及中国近海海平面变化趋势研究进展及展望[J]. *地球与行星物理理论评*, 52(3): 266-279.
- 陈凌, 王旭, 王新, 等. 2022. 接收函数界面和波速成像研究进展与展望[J]. *地球与行星物理理论评*, 53(6): 680-701.
- 崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 2017. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题[J]. *中国科学院院刊*, 32(9): 985-992.
- 党亚民, 蒋涛, 杨元喜, 等. 2023. 中国大地测量研究进展 (2019—2023) [J]. *测绘学报*, 52(9): 1419-1436.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. *中国科学 D 辑*, 32(12): 1020-1030.
- 段虎荣, 张永志, 徐海军, 等. 2011. 卫星重力测量数据反演中国西部地壳水平运动速率[J]. *地震研究*, 34(3): 344-349.
- 段虎荣, 康明哲, 吴绍宇, 等. 2020. 利用 GRACE 时变重力场反演青藏高原的隆升速率[J]. *地球物理学报*, 63(12): 4345-4360.
- 甘卫军. 2021. 中国大陆地壳运动 GPS 观测技术进展与展望[J]. *城市与减灾*, 2021(4): 39-44.
- 姜卫平, 周晓慧, 刘经南, 等. 2008. 青藏高原地壳运动与应变的 GPS 监测研究[J]. *测绘学报*, 37(3): 285-292.
- 姜卫平, 王锴华, 李昭, 等. 2018. GNSS 坐标时间序列分析理论与方法及展望[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 43(12): 2112-2123.
- 孔屏, 那春光. 2007. 青藏高原的剥蚀与构造抬升[J]. *第四纪研究*, 27(1): 1-5.
- 李吉均, 文世宣, 张青松. 1979. 中国青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨[J]. *中国科学*, 6: 608-616.
- 刘传金, 季灵运, 朱良玉, 等. 2024. 联合 InSAR 和 GNSS 构建青藏高原千米分辨率三维地壳形变场[J]. *中国科学: 地球科学*, 254(6): 1845-1862.
- 刘德民, 王杰, 姜淮, 等. 2024. 青藏高原形成演化动力机制及其远程效应[J]. *地学前缘*, 31(1): 154-169.
- 刘杰, 方剑, 李红蕾, 等. 2015. 青藏高原 GRACE 卫星重力长期变化[J]. *地球物理学报*, 58(10): 3496-3506.
- 刘经南, 许才军, 宋成骅, 等. 1998. 青藏高原中东部地壳运动的 GPS 测量分析[J]. *地球物理学报*, 41(4): 518-524.
- 刘经南, 许才军, 宋成骅, 等. 2000. 精密全球卫星定位系统多期复测研究青藏高原现今地壳运动与应变[J]. *科学通报*, 45(24): 2658-2663.
- 吕庆田, 姜枚, 马开义, 等. 1998. 青藏高原中部岩石圈结构、变形及地球动力学模式的天然地震学研究[J]. *地球科学*, 23(1): 26-31.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2008. 地幔岩石圈热结构差异与中国大陆岩石圈均衡分析[J]. *地球物理学报*, 51(4): 1058-1065.
- 孙文科. 2002. 低轨道人造卫星 (CHAMP、GRACE、GOCE) 与高精度地球重力场——卫星重力大地测量的最新发展及其对地球科学的重大影响[J]. *大地测量与地球动力学*, 22(1): 92-100.
- 唐河, 孙文科. 2021. 黏弹地球地震变形理论研究进展和展望[J]. *地球与行星物理理论评*, 52(1): 11-26.
- 汪汉胜, 许厚泽, 李国营. 1997. 青藏高原更新世晚期冰川的均衡效应[J]. *测绘学报*, 26(2): 56-62.
- 汪汉胜, Wu Patrick, 许厚泽. 2009. 冰川均衡调整 (GIA) 的研究[J]. *地球物理学进展*, 24(6): 1958-1967.
- 王敏, 沈正康, 董大南. 2005. 非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响和修正[J]. *地球物理学报*, 48(5): 1045-1052.
- 王敏, 沈正康. 2020. 中国大陆现今构造变形: 三十年的 GPS 观测与研究[J]. *中国地震*, 36(4): 660-683.
- 王琪, 游新兆, 王启梁. 1996. 用全球定位系统 (GPS) 监测青藏高原地壳形变[J]. *地震地质*, 18: 97-103.
- 王琪. 2003. 中国大陆现今地壳运动研究[J]. *地震学报*, 25: 541-547.
- 汪秋昱, 饶维龙, 张岚, 等. 2022. GRACE 时变重力信号反演方法研究的进展和展望[J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 50(9): 104-116.
- 邢乐林, 孙文科, 李辉, 等. 2011. 用拉萨点大地测量资料检测青藏高原地壳的增厚[J]. *测绘学报*, 40(1): 41-44.
- 邢乐林, 王林海, 胡敏章, 等. 2017. 时变重力测量确定青藏高原地壳隆升与增厚速率[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 42(5): 569-574.
- 许厚泽, 周旭华, 彭碧波. 2005. 卫星重力测量[J]. *地理空间信息*, 3(1): 1-3.
- 许志琴, 姜枚, 杨经绥. 1996. 青藏高原北部隆升的深部构造物理作用——以“格尔木-唐古拉山”地质及地球物理综合剖面为例[J]. *地质学报*, 70(3): 195-206.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起[J]. *地学前缘*, 6(3): 139-152.
- 许志琴, 姜枚, 杨经绥, 等. 2004. 青藏高原的地幔结构: 地幔羽、地幔剪切带及岩石圈俯冲板片的拆沉[J]. *地学前缘*, 11: 329-343.
- 姚檀栋. 2019. 青藏高原水-生态-人类活动考察研究揭示“亚洲水塔”的失衡及其各种潜在风险[J]. *科学通报*, 64(27): 2761-2762.
- 游新兆, 杜瑞林, 王琪, 等. 2001. 中国大陆地壳现今运动的 GPS 测量结果与初步分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 21(8): 1-8.
- 张岚, 孙文科. 2022. 重力卫星 GRACE Mascon 产品的应用研究进展与展望[J]. *地球与行星物理理论评*, 53(1): 35-52.
- 张培震, 马琪, 马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. *地学前缘*, 9(2): 442-450.
- 张培震, 王伟涛, 甘卫军, 等. 2022. 青藏高原的现今构造变形与地球动力过程[J]. *地质学报*, 96(10): 3297-3313.
- 钟大赉, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. *中国科学 (D 辑)*, 26(4): 289-295.
- 朱介寿, 王绪本, 杨宜海, 等. 2017. 青藏高原东缘的地壳流及动力过程[J]. *地球物理学报*, 60(6): 2038-2057.
- 朱文耀, 程宗颐, 王小亚, 等. 1998. 青藏高原地壳运动 GPS 实测结果的定量分析[J]. *自然杂志*, 20(6): 363.