DOI:10.14075/j.jgg.2024.09.447

文章编号:1671-5942(2025)10-1006-07

基于连续 GNSS 观测的青藏高原东北缘地壳应变与垂向运动特征研究

张 陶[1] 田 镇[1,2,3] 计国锋[4] 黎建勇[1] 于 鑫[1]

1 长安大学地质工程与测绘学院,西安市雁塔路 126 号,710054
2 黄土科学全国重点实验室,西安市雁塔路 126 号,710054
3 陕西省影像大地测量共性技术研发平台,西安市浐灞三路 789 号,710016
4 千寻位置网络有限公司,上海市国权北路 1688 弄 38 号,200438

摘 要:基于连续 GNSS 观测数据,在充分考虑随机噪声与区域环境负载的前提下建立青藏高原东北缘地区现今较为完备的 GNSS 三维速度场,并刻划研究区地壳应变与垂向运动特征。结果显示,研究区整体以压缩应变为主,且西南部和东北部的主应变率差异明显;最大剪切应变与主应变在东昆仑断裂和鲜水河断裂分布显著。青藏高原东北缘以垂直抬升为主,意味着垂向构造力源可能来自于块体内部的挤压缩短,或是岩石圈深部物质流动受阻等;而在兰州附近地区表现出明显的地表沉降,推测可能是湿陷性黄土、水土流失等因素引起。最后,基于不可压缩的地球模型估计得到研究区岩石圈在水平挤压环境下所引起的垂向形变较小,意味着青藏高原东北缘的大范围隆升可能主要由下地壳流、岩石圈对流减薄等垂向构造因素引起,而非地壳的水平挤压缩短。

关键词:三维速度场;垂向形变;GNSS 成像;水平应变;青藏高原东北缘

中图分类号:P228;P313 **文献标识码**:A

青藏高原东北缘是印度板块与欧亚板块碰撞导致青藏高原扩张的前沿,也是青藏高原的重要边界[1],其内部构造活动复杂且剧烈,地质灾害频发[2]。因此,青藏高原东北缘地壳运动特征的厘定有助于理解高原现今整体的隆升机制与动力过程[3]。近年来,以 GNSS、InSAR、卫星重力等为代表的空间大地测量技术不仅为较为直观定量地展示区域地壳形变的总体态势提供了有力支撑,也为研究青藏高原东北缘现今的构造形变机制提供了重要证据[4-6]。

目前,涵盖整个青藏高原地区的水平 GNSS 速度场在一定程度上较好地反映了青藏高原现今的一阶地壳形变特征[7-9];针对区域的垂向变形,Liang 等[10]利用青藏高原周围 726 个 GNSS 测站数据处理得到垂向速度场,结果显示,青藏高原东北缘以垂直隆升为主。水准数据与 GNSS 数据联合处理的结果则发现,研究区在甘孜-玉树-鲜水河断裂南部地表出现明显沉降,这可能是下地壳流和重力坍塌导致的结果[11]。前人研究结果虽揭示了青藏高原东北缘地区整体的地壳形变特征,但由于已公布的连续 GNSS 台站仍较为匮乏,垂向形变信号的分辨率依然有限,进一步制约了对青藏高原东北缘形变机制与运动态势的深入认识,且 GNSS 垂向信号的信噪比更低、非构造信号的干扰更大、涉及的地球物理效应也更复杂[12-13]。基于此,本文充分收集了青藏高原东北缘更为全面的 GNSS 连续观测数据,并结合已有成果,在充分考虑随机噪声与区域环境负载的前提下,建立研究区较为完备的 GNSS 三维速度场,进一步获取高分辨率地壳运动图像,试图揭示青藏高原东北缘现今地壳形变特征。

1 研究数据

1.1 GNSS 观测与处理

为监测青藏高原东北缘地区地壳形变,中国地震局等单位在中国大陆地区建立了系统的 GNSS 监测网,即中国大陆构造环境监测网络(CMONOC),其中研究区有 15 个观测站点,时间

收稿日期:2024-09-26

项目来源:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1000500);中国博士后科学基金(2022M710012,2023T160557);地震动力学国家重点实验室基金(LED2022B02);陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队项目(2022)。

第一作者简介:张陶,硕士生,主要从事 GNSS 地壳形变监测研究,E-mail:2022126017@chd.edu.cn。

通讯作者:田镇,博士,高级工程师,主要从事 InSAR/GPS 等多源数据融合的地壳形变监测与模拟研究,E-mail:zhen.tian@chd.edu.cn。

序列数据可由中国地震局 GNSS 数据产品服务平台开放获取。本文在此基础上收集了千寻位置网络有限公司在研究区布设的 47 个 CORS 站静态观测数据,空间范围为 32°～38°N、94°～103°E,起止时间为 2016-11—2022-11,接收机为千寻位置网络有限公司研发的高精度 GNSS 接收机,观测天线为 HXCCGX601A 型 3D 扼流圈天线,测点布设位置大部分位于稳定建筑物顶部,极少数位于土层之上,天线高直接量取至天线相位中心参考点,数据的采样间隔为 30 s。测站分布见图 1,本文采用 Bernese 5.2 软件进行统一的数据解算,以获取测站的坐标时间序列。

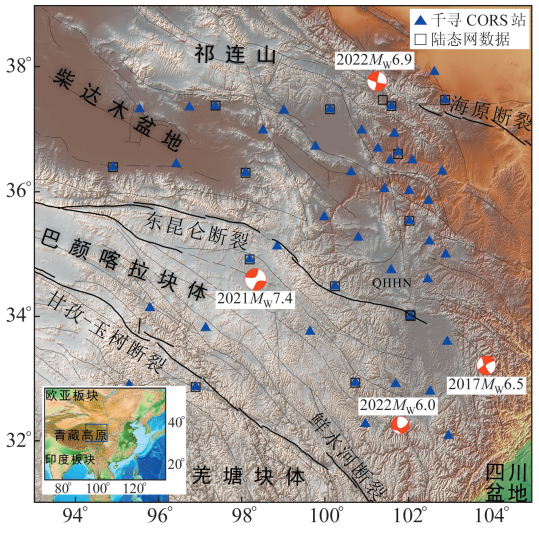


图 1　区域构造背景与 GNSS 测站分布

Fig. 1　Regional tectonic background and distribution map of GNSS stations

本文首先采用 Bernese 5.2 软件的精密单点定位和双差模式实现测站的数据解算:以精密单点定位的坐标作为双差处理的先验坐标,形成一组独立的双差基线,并采用国际地球自转服务(IERS)推荐的通用模型。此外,FES2004 海洋潮汐载荷修正、大气 S_1/S_2 潮汐载荷修正及 IGS 发布的卫星和接收器绝对相位中心修正也被应用于观测方程的制定。对流层延迟先验值通过使用 GMF 函数进行建模,以 1 h 间隔进行估计。对原始观测结果进行处理,通过无电离层线性组合消除一阶电离层延迟,并按照 Petrie 等[14]的建议对高阶项进行修正。在位置参数的最小二乘估计中固定卫星轨道和地球自转参数,以解决相位模糊性的问题,并充分考虑 GNSS 站之间的几何相关性。最后,通过 Helmert 转换参数施加最小约束,将单天解转换至 ITRF2014 参考框架[15]。经对比,千寻数据和陆态网时间序列在时间与空间上有着较好的一致性,因此本文直接对研究数据进行后续处理。

1.2　数据预处理与噪声模型

在获取 GNSS 测站的单天解后,进一步采用 Hector 软件[16]分析时间序列,以估计测站的三维速度场。首先对时间序列中由粗差和跳变引起的异常值进行探测与剔除,同时结合观测时间序列中包含的同震位移数据,进一步考虑研究区域观测时段内的 $M_W \geqslant 6.0$ 地震(图 1)[7,13,17-18],并根据地震发生的时间仔细查看站点时间序列,发现九寨沟地震和马尔康地震未导致数据发生明显偏移,而对于玛多地震和门源地震,直接剔除地震发生后偏移超过 10 mm 的数据。

此外,连续 GNSS 时间序列中往往包含线性构造信号、环境负载等因素导致的周期性信号及观测噪声等。研究表明,白噪声加闪烁噪声(WN+FN)是研究区域 GNSS 观测中最为常见的噪声组合模型[3]。因此,采用此模型针对本文时间序列的噪声进行建模。

1.3　地表环境负载

水文负荷(HYDL)、非潮汐大气负荷(NTAL)和非潮汐海洋负荷(NTOL)等环境负荷变化会引起地壳的弹性形变,这是造成地表非线性变化的主要因素[19]。因此,本文采用德国地学研究中心(GFZ)提供的环境产品来识别时间序列分量中的负荷信号[19-20],统一 3 种环境负载产品的时间分辨率,并将其叠加作为总的环境负载改正数据[20]。由于研究区内水平向时序数据的周期性信号较弱,本文重点针对垂向地表负载效应进行建模,并予以剔除。以 GSLQ、GSWW、QHDL 测站的垂向时间序列为例,采用最小二乘方法初步估计并剔除观测数据中的线性趋势[20],并与 GFZ 提供的环境负载数据进行对比,发现两者有较好的一致性(图 2),表明 GFZ 提供的产品数据能够较好地反映研究区的环境负载效应。

从 GNSS 垂向时间序列中扣除 GFZ 环境负载产品(NTAL+HYDL+NTOL)的影响后,估计环境负载改正前后时序数据均方根(RMS)的减少率。RMS 减少率大于 0,说明 GNSS 坐标时间序列经环境负载改正后 RMS 值减小。RMS 减少率数值越大,改正效果越好;反之,环境负载改正效果较差[20]。结果显示,所有站点时间序列的 RMS 值都有所降低(图 3),平均降低 8.27%,说明环境负载改正较好地提升了时间序列建模的精度。

1.4　GNSS 三维速度场

针对本文环境负载与噪声模型进行改正后,进一步基于最小二乘方法估计得到青藏高原东北

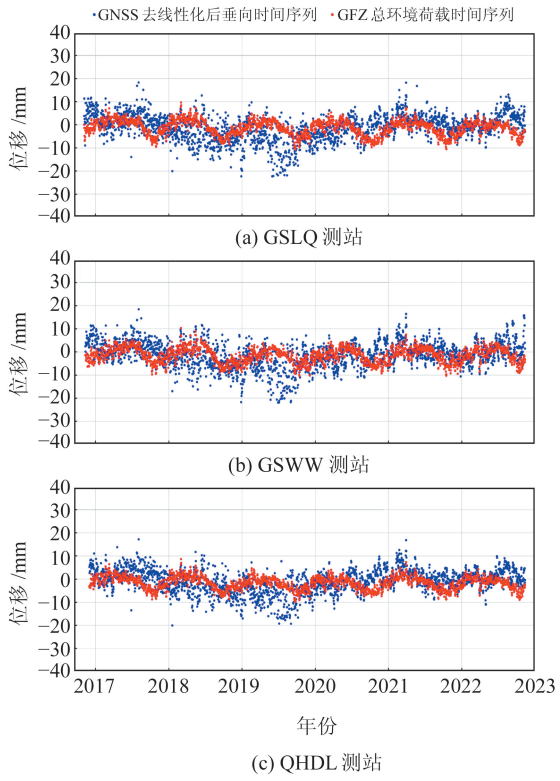


图 2 GNSS 测站垂向时间序列

Fig. 2 Vertical time series of GNSS stations

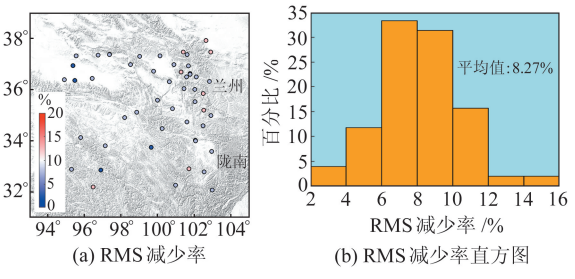


图 3 去除环境负载后 GNSS 垂向时间序列的 RMS 减少率和减少率直方图

Fig. 3 RMS reduction rate and RMS reduction rate histogram of GNSS vertical time series after removing environmental loads

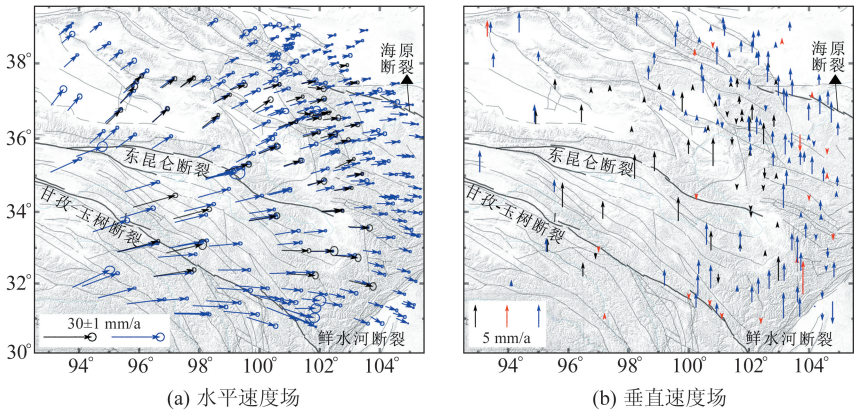
缘地区连续观测站的三维速度场。结果显示，本文水平速度场结果与 Wang 等[8]的研究结果基本一致，大部分公共站点的速度场差异小于 2 mm/a。将水平速度场的参考基准转化至相对稳定的欧亚板块(旋转欧拉矢量与 Wang 等[8]的一致)，并与 Wang 等[8]的速度场结果进行融合。另外，将垂向速度场结果与 Liang 等[10]和 Pan 等[17]的结果进行对比，发现本文结果与 Pan 等[17]的站点结果基本一致，与 Liang 等[10]的结果仍有部分站点的速度值差异超过 2 mm/a。考虑本文与 Pan 等[17]的研究测站均为连续观测，而 Liang 等[10]的研究测站大部分为流动观测，因此移除 Liang 等[10]成果中差异较大的部分站点(≥2 mm/a)，最终获取研究区目前较为完备、精细的 GNSS 三维速度场(图 4)。

速度场结果显示，印度板块挤压欧亚板块导致青藏高原东北缘的地壳速度从南向北递减，速度矢量方向由西向东顺时针旋转(图 4(a))。青藏高原东北缘大部分地区垂直运动表现为隆起，最大隆升速率不超过 5 mm/a，海原断裂西部隆升速率约为 2～3 mm/a；此外，还有部分地区处于沉降状态(图 4(b))。

2 GNSS 水平应变率

GNSS 数据直接获得的速度场通常会因参考基准的不同产生较大差异，然而应变率往往不受参考系的影响，可以更好地表征地壳变形和应变积累[3]。因此，本文采用 Savage 等[21]通过偏微分计算的研究区域应变率场，区域最大剪切应变率、面膨胀率、最大/最小主应变率见图 5。

地壳应变图像显示，几条大型走滑断裂带的剪应变速率值较高(图5(a)，如东昆仑断裂和鲜

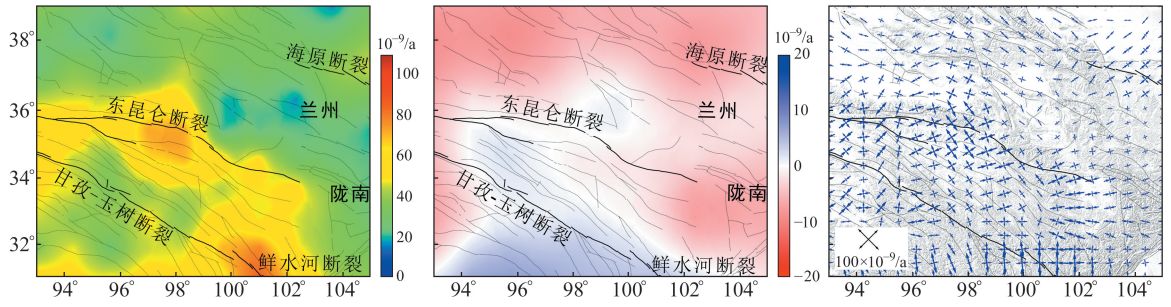


图(a)中黑色箭头表示本文估计得到速度场，蓝色箭头表示 Wang 等[8]的速度场；图(b)中黑色箭头表示本文估计得到速度场，蓝色和红色箭头分别表示 Liang 等[10]和 Pan 等[17]的速度场

图 4 青藏高原东北缘三维速度场

Fig. 4 3D velocity field of northeastern margin of Qinghai-Xizang plateau

水河断裂),表明断裂活动程度较高;而其他区域的剪应变率则不明显。研究区整体以压缩应变为主,压缩最大值主要集中于东南部和海原断裂北部(图 5(b))。主应变方向自西向东呈顺时针旋转,跨过东昆仑断裂后,应变率矢量逐渐减小(图 5(c))。



(a) 剪应变率　(b) 面膨胀率　(c) 主应变率

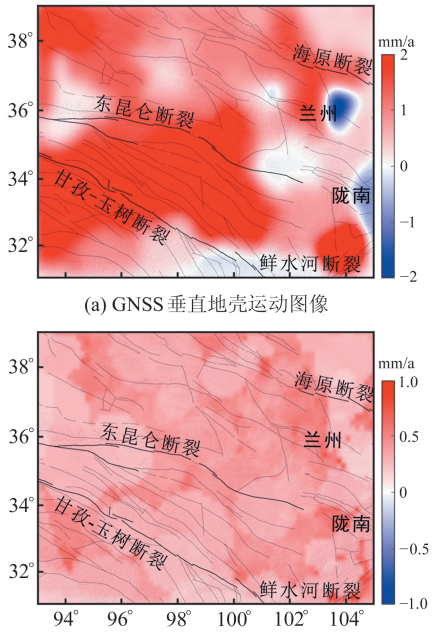
图 5　青藏高原东北缘应变速率

Fig. 5　Strain rates in northeastern margin of Qinghai-Xizang plateau

3　GNSS 垂向运动与成像

相对于水平方向,青藏高原东北缘地区的垂向速度场成果仍较为有限(图 4)。本文采用 GNSS 成像技术[12],以更加直观地展示研究区垂向地壳形变特征,该方法的稳健性和空间相关性均强于传统的插值方法。针对青藏高原、美国加州与内华达州等地区的研究均表明,在有限的垂向速度场前提下,GNSS 成像技术能够充分顾及周缘地壳的运动特征、合理剔除或削弱离群点信号,较为直观地展示出区域现今的垂向形变特征[12,17,22]。

GNSS 成像技术的主要过程包括构建空间结构函数(SSF)和顾及空间结构的中值空间滤波[12,17]。本文将滤波速度作为输入数据,划分研究区域网格,使用 Delaunay 三角测量法将各个网格点与相邻站点之间进行连接,并建立空间结构关系;然后采用 MSF 将每个网格点的速度用相邻站点速度的加权中位数替换,生成研究区垂向地壳运动图像和不确定性分布,具体见图 6。结果表明,青藏高原东北缘大部分地区处于隆升状态,巴颜喀拉块体西部地区尤为明显,最大隆升速率不超过 5 mm/a,而在兰州、陇南附近的沉降较为明显。



(a) GNSS 垂直地壳运动图像

(b) 不确定性分布图

图 6　GNSS 垂向地壳运动图像和不确定性分布

Fig. 6　GNSS vertical crustal motion image and uncertainty distribution

4　讨　论

4.1　青藏高原东北缘地壳水平形变特征

结合已有研究,本文建立了青藏高原东北缘高分辨率的 GNSS 水平速度场(图 4),结果显示,由于受鄂尔多斯块体的阻碍,青藏高原东北缘自东向西速度场的 EW 向分量逐渐增大,自南向北速度场的 NS 向分量逐渐减小,整体呈顺时针旋转。这与青藏高原整体运动趋势一致,揭示研究区域横向扩张受阻,导致地壳缩短[22]。

在青藏高原东北缘,东昆仑断裂和鲜水河断裂剪切应变较为明显(图 5(a)),表明区域断裂的走滑运动显著,也侧面反映了东昆仑断裂作为青藏高原横向挤出的通道,在调节区域地壳运动与形变过程中起着重要作用[1]。同时,川滇块体与鄂尔多斯块体内部的剪应变不明显(图 5(a)),这意味着上述块体内部构造活动较弱,整体相对稳定[22]。另一方面,由于青藏高原的横向扩张受鄂尔多斯块体与川滇块体的阻碍,青藏高原东北缘地区以压缩应变为主(图 5(b)),而甘孜-玉树-鲜水河断裂南部地区的面膨胀率为正,表明该区地

壳正经历局部扩张变形(图5(b)),这与青藏高原内部受重力作用导致地壳变薄的假设[1,22]一致。整体来看,研究区自西向东主压应变方向从NE-SW向转变为近EW向,其量值也随向北和向东的延伸逐渐减弱(图5(c)),这可能是区域东部地壳受鄂尔多斯块体与川滇块体的阻挡而造成的;南部巴颜喀拉块体和羌塘块体内部主应变率较为明显,这可能意味着上述两个块体内部正经历着弥散式的地壳变形[23]。

4.2 青藏高原东北缘地壳垂向形变特征

为建立可靠的垂向速度场,本文去除了环境负载效应对GNSS坐标时间序列的影响。结果显示,在扣除环境负载效应后,几乎所有站点时间序列的建模精度都有所上升(图3),表明环境负载改正能较好地削弱区域垂向GNSS观测的非线性变化[20]。此外,研究区约6%站点的速度差异大于0.5 mm/a,最大差异为QHHN测站,达3.8 mm/a,这可能是因为非潮汐大气负载(NTAL)的值较大。

基于GNSS成像技术获取的垂向形变场结果显示,青藏高原东北缘大部分区域处于抬升状态(图6(a)),这可能是由于该区域整体构造以挤压变形为主,导致弹性地壳在挤压应力下形成整体隆升[4,6,17];也可能是由区域深部岩石圈物质在向西流动过程中受鄂尔多斯块体或四川盆地的阻碍引起[4]。值得注意的是,在巴颜喀拉块体中西部,GNSS测站的分布较为稀疏,但几乎所有站点均表现为抬升(图4(b)),在一定程度上说明该区域地壳隆升是其主要特征之一。但考虑到研究区大部分测站的速度不确定度约为0.5 mm/a(图6(b)),未来仍有必要增加台站密度,以进行更深入的分析。

而在兰州、陇南地区,GNSS垂向地壳运动图像显示出明显的地表沉降。实际上,该区GNSS观测结果主要来自于参考文献[10,17](图4),且该地区的站点均布设于基岩之上,一定程度上反映了该区的地壳变化特征。其中,兰州地区部分InSAR观测结果同样显示该地区沉降明显,推测可能与湿陷性黄土、水土流失和降水量匮乏有关[24-25];陇南地区虽也显示出一定的地表沉降,但沉降量较小(图6(a)),未来还需结合其他大地测量结果进行深入分析。

4.3 垂直构造运动的动力源分析

假设青藏高原东北缘岩石圈是由不可压缩的地壳和上地幔组成,可计算由水平构造运动引起的垂向形变,并以此评估剩余垂向构造运动的影响[26]。在不可压缩的地球模型中,当岩石圈受水平挤压时,会在垂向产生相应的形变,其与面膨胀率、泊松比和岩石圈-软流圈深度(DLAB)有关。将基于上述估计的面膨胀率(图5)与区域泊松比、岩石圈-软流圈深度(DLAB)相乘,即可得到区域由水平构造运动产生的垂向形变,其中DLAB可由LITHO1.0模型获取[27],对于不可压缩的地球模型,设置泊松比为0.5[28-29]。

在水平构造驱动下,青藏高原东北缘地壳整体呈微弱抬升状态,所有站点的垂向形变不超过1 mm/a,说明研究区大范围的抬升不是由水平构造挤压造成的,可能来源于垂向构造运动[30]。主要形成机制包括:1)下地壳流。在青藏高原东北缘中部和南部地区,青藏高原内部物质东向扩展受四川盆地的阻挡,中下地壳物质以塑性流变的方式在巴颜喀拉块体之下堆积,导致该区长期以垂直隆升运动为主[4]。2)岩石圈对流。青藏高原东北缘的垂向变形特征可能与多次岩石圈对流减薄有关,不同期次岩石圈的拆离可能导致区域地表出现差异隆升[31]。3)重力均衡调整。青藏高原东北缘在阿拉善与鄂尔多斯块体的阻挡作用下出现重力均衡调整,也可能导致地壳增厚和区域隆升同时发生[31-32]。4)底侵作用。幔源地壳物质增生到大陆地壳底部的过程中,使青藏高原东北缘西部的地壳平均厚度比东部厚,地幔高密度物质容易在此堆积,并与地壳产生底侵作用,从而导致研究区西部比东部隆升速率大[33]。由于本文结果仅反映地表或上地壳的运动特征,且仅基于简单的不可压缩地球模型推测出青藏高原东北缘地壳抬升的动力源主要来自于垂向构造,无法判断具体的构造机制,未来需结合其他技术手段(InSAR、重力观测等)进行综合分析和研究[26]。

5 结 语

作为青藏高原隆升和变形的前缘,构建青藏高原东北缘现今精细的三维地壳运动特征模型,是理解青藏高原构造机制与隆升过程的关键。本文基于连续GNSS观测数据获取研究区GNSS三维速度场,探讨其地壳应变与垂向运动特征。结果显示,东昆仑和鲜水河断裂的最大剪切应变和主应变分布明显,意味着该区断裂活动强烈;区域整体以压缩应变为主,主应变率在西南部和东北部差异显著,主要是由于高原的横向扩张受鄂尔多斯块体与川滇块体的阻碍。青藏高原东北缘大部分区域处于隆升状态,而在兰州附近出现下沉,推测其局部沉降可能与湿陷性黄土、水土流失

等因素有关。研究区由水平构造运动引起的垂向形变量级较低,说明其大范围地壳隆升可能受下地壳流、岩石圈对流减薄等垂直构造因素影响。

参考文献

[1] Zhang Z H,Pan Z Y. Geodetic and Seismic Constraints on Contemporary Deformation on the Northeastern Tibetan Plateau: Velocity and Strain Rate Tensor Analysis[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2023, 338

[2] Hao M, Wang Q L, Shen Z K, et al. Present Day Crustal Vertical Movement Inferred from Precise Leveling Data in Eastern Margin of Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 2014, 632: 281-292

[3] Su X N, Yao L B, Wu W W, et al. Crustal Deformation on the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau from Continuous GPS Observations[J]. Remote Sensing, 2019, 11(1)

[4] 王双绪,蒋锋云,郝明,等. 青藏高原东缘现今三维地壳运动特征研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3334-3345(Wang Shuangxu, Jiang Fengyun, Hao Ming, et al. Investigation of Features of Present 3D Crustal Movement in Eastern Edge of Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10):3334-3345)

[5] Zhang G F, Qu C Y, Shan X J, et al. Present-Day Crustal Deformation of the Northwestern Tibetan Plateau Based on InSAR Measurements[J]. Remote Sensing, 2023, 15(21)

[6] Pan Y J, Shen W B, Shum C K, et al. 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, 2018, 502: 12-22

[7] Zheng G, Wang H, Wright T J, et al. Crustal Deformation in the India-Eurasia Collision Zone from 25 Years of GPS Measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122(11): 9290-9312

[8] Wang M, Shen Z K. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived from GPS and Its Tectonic Implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(2)

[9] Li Y H, Liu M, Wang Q L, et al. Present-Day Crustal Deformation and Strain Transfer in Northeastern Tibetan Plateau [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 487: 179-189

[10] Liang S M, Gan W J, Shen C Z, et al. Three-Dimensional Velocity Field of Present-Day Crustal Motion of the Tibetan Plateau Derived from GPS Measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(10): 5722-5732

[11] Wu Y Q, Zheng Z J, Nie J L, et al. High-Precision Vertical Movement and Three-Dimensional Deformation Pattern of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2022, 127(4)

[12] Hammond W C, Blewitt G, Kreemer C. GPS Imaging of Vertical Land Motion in California and Nevada: Implications for Sierra Nevada Uplift[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(10): 7681-7703

[13] Pan Y J, Jiang W P, Ding H, et al. Intradecadal Fluctuations and Three-Dimensional Crustal Kinematic Deformation of the Tianshan and Pamir Derived from Multi-Geodetic Imaging[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2023, 128(1)

[14] Petrie E J, King M A, Moore P, et al. Higher-Order Ionospheric Effects on the GPS Reference Frame and Velocities[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2010, 115(B3)

[15] Cetin S, Aydin C, Dogan U. Comparing GPS Positioning Errors Derived from GAMIT/GLOBK and Bernese GNSS Software Packages: A Case Study in CORS-TR in Turkey [J]. Survey Review, 2019, 51(369): 533-543

[16] Bos M S, Fernandes R M S, Williams S D P, et al. Fast Error Analysis of Continuous GNSS Observations with Missing Data [J]. Journal of Geodesy, 2013, 87(4): 351-360

[17] Pan Y J, Hammond W C, Ding H, et al. GPS Imaging of Vertical Bedrock Displacements: Quantification of Two-Dimensional Vertical Crustal Deformation in China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(4)

[18] Tian Z, Freymueller J T, He Y, et al. Postseismic Deformation due to the 2021 M_W7.4 Maduo(China) Earthquake and Implications for Regional Rheology and Seismic Hazards around the Bayan Har Block[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2024, 647: 13

[19] 李辰风. 基于环境负荷的地表形变及其周期信号研究[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2241(Li Chenfeng. Research on the Earth Surface Deformation and Its Periodic Signal Based on Environmental Loading[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2241)

[20] 孙之远,李岩林,魏娜. 陆态网基准站高程时间序列的环境负载效应分析[J]. 全球定位系统, 2022, 47(6): 60-66(Sun Zhiyuan, Li Yanlin, Wei Na. Analysis of Environmental Loading Corrections on CMONOC Vertical Coordinate Time Series [J]. GNSS World of China, 2022, 47(6):60-66)

[21] Savage J C, Gan W J, Svarc J L. Strain Accumulation and Rotation in the Eastern California Shear Zone[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2001, 106(B10): 21995-22007

[22] Xiang Y F, Wang H, Chen Y Y, et al. GNSS Imaging of Strain Rate Changes and Vertical Crustal Motions over the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 2021, 13(23)

[23] Tian Z, Yang Z Q, Bendick R, et al. Present-Day Distribution of Deformation around the Southern Tibetan Plateau Revealed by Geodetic and Seismic Observations[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 171: 321-333

[24] 王睿博,甘淑. 兰州市城区沉降监测及其空间分异特性分析[J]. 工程勘察, 2023, 51(3): 51-58(Wang Ruibo, Gan Shu. Settlement Monitoring and Spatial Differentiation Analysis of Lanzhou City[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2023, 51(3): 51-58)

[25] Xu Y M, Wu Z, Zhang H W, et al. Land Subsidence Monitoring and Building Risk Assessment Using InSAR and Machine Learning in a Loess Plateau City—A Case Study of Lanzhou, China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(11)

[26] She Y W, Fu G Y. Viscosities of the Crust and Upper Mantle Constrained by Three-Dimensional GPS Rates in the Sichuan-Yunnan Fragment of China[J]. Earth Planets and

Space, 2019, 71(1)

[27] Pasyanos M E, Masters T G, Laske G, et al. LITHO1.0: An Updated Crust and Lithospheric Model of the Earth[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119(3): 2153-2173

[28] Kaener G D. Spectral Representation of Isostatic Models [J]. Journal of Australian Geology and Geophysics, 1982, 7(1): 55-62

[29] Walcott R I. Flexural Rigidity, Thickness, and Viscosity of the Lithosphere[J]. Journal of Geophysical Research (1896-1977), 1970, 75(20): 3941-3954

[30] 庞亚瑾, 程惠红, 张怀, 等. 青藏高原东缘岩石圈结构对现今地表垂向运动影响的数值分析[J]. 地球物理学报, 2019, 62(4): 1256-1267(Pang Yajin, Cheng Huihong, Zhang Huai, et al. Numerical Analysis of the Influence of Lithospheric Structure on Surface Vertical Movements in Eastern Tibet[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(4): 1256-1267)

[31] 梁晓峰, 陈凌, 田小波, 等. 青藏高原地壳结构特征指示的高原隆升机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(12): 2808-2829(Liang Xiaofeng, Chen Ling, Tian Xiaobo, et al. Uplifting Mechanism of the Tibetan Plateau Inferred from the Characteristics of Crustal Structures[J]. Scientia Sinica Terrae, 2023, 53(12): 2808-2829)

[32] 崔笃信, 王庆良, 胡亚轩, 等. 青藏高原东北缘岩石圈变形及其机理[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1490-1499 (Cui Duxin, Wang Qingliang, Hu Yaxuan, et al. Lithosphere Deformation and Deformation Mechanism in Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6):1490-1499)

[33] 王泽利, 何樵登, 孟令顺. 青藏高原北缘深部地壳结构特征及其形成机制探讨[J]. 世界地质, 2002, 21(2): 105-110(Wang Zeli, He Qiaodeng, Meng Lingshun, et al. The Crustal Structure of the Northern Margin of Qinghai-Tibet Plateau and Its Genetic Analysis[J]. World Geology, 2002, 21(2):105-110)

Crustal Strain and Vertical Movement Characteristics of the Northeastern Margin of the Qinghai-Xizang Plateau Based on Continuous GNSS Observations

ZHANG Tao[1] *TIAN Zhen*[1,2,3] *JI Guofeng*[4] *LI Jianyong*[1] *YU Xin*[1]

1 School of Geology and Geomatics, Chang'an University, 126 Yanta Road, Xi'an 710054, China

2 State Key Laboratory of Loess Science, 126 Yanta Road, Xi'an 710054, China

3 Generic Technical Development Platform of Shaanxi Province for Imaging Geodesy, 789 Third-Chanba Road, Xi'an 710016, China

4 Qianxun Spatial Intelligence Inc, 38 Lane 1688 North-Guoquan Road, Shanghai 200438, China

Abstract: Based on continuous GNSS observation data, a relatively comprehensive three-dimensional GNSS velocity field for the northeastern margin of the Qinghai-Xizang plateau was established by fully considering random noise and regional environmental loading. This study characterizes crustal strain and vertical motion patterns in the research area. Results show that the region is dominated by compressive strain, with significant differences in principal strain rates between its southwestern and northeastern sectors. Notable distributions of maximum shear strain and principal strain are observed along the east Kunlun fault and Xianshuihe fault. Vertical uplift predominates across the northeastern Qinghai-Xizang plateau, suggesting that vertical tectonic forces may originate from intra-block compressional shortening or obstruction of deep lithospheric material flow. However, significant surface subsidence near the Lanzhou area is likely attributed to collapsible loess and soil erosion. Finally, estimates based on an incompressible Earth model indicate minimal vertical deformation caused by horizontal compression, implying that large-scale uplift in the northeastern Qinghai-Xizang plateau may primarily result from vertical tectonic factors such as lower crustal flow and lithospheric convective thinning, rather than horizontal crustal shortening.

Key words: 3D velocity field; vertical deformation; GNSS imaging; horizontal strain; northeastern margin of Qinghai-Xizang plateau

Foundation support: Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration—National Science and Technology Major Project, No. 2024ZD1000500; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2022M710012, 2023T160557; State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, No. LED2022B02; Geoscience Big Data and Geohazard Prevention Innovation Team of Shaanxi Province, No. 2022.

About the first author: ZHANG Tao, postgraduate, majors in GNSS crustal deformation monitoring, E-mail: 2022126017@chd.edu.cn.

Corresponding author: TIAN Zhen, PhD, senior engineer, majors in InSAR/GPS and other data sources for crustal deformation monitoring and modelling, E-mail: zhen.tian@chd.edu.cn.