Communications Earth & Environment: 现今青藏高原的生长状态

大约在 60 个百万年前,印度次大陆和欧亚板块的碰撞形成现今的世界第三 极——青藏高原以及绵延近 2500 公里的世界高峰——喜马拉雅山脉。而青藏高原的 前身则是更早的冈瓦纳大陆裂解和几期特提斯洋闭合过程中,几大陆块的拼合, 从而形成以几条缝合线——雅鲁藏布缝合线(YTS)、班公怒江缝合线(BNS)、金沙江 缝合线(JRS)——为分界的——从南向北——拉萨地块、羌塘地块、松潘-甘孜地块。印 度和欧亚两大板块的汇聚过程,在抬升青藏高原的同时,伴随着一系列火山、地 震和褶皱等构造活动,也伴随着强烈地表剥蚀、沉积和物质运移对高原地貌进行 改造,从而形成现今海拔近 5000 米的平坦高原。

关于青藏高原的成因,大量地质学、地震学和地球物理学的研究提出多种生 长机制,包括最早由 Argand (ARGAND, 1924)提出的印度板块向北平俯冲的双地 壳模式、与前者相对应的亚洲板块南向俯冲模式 (Tapponnier et al., 2001; Willett & Beaumont, 1994)、挤压作用下的地壳增厚模式 (Dewey & Burke, 1973)、地幔拆沉-反弹模式 (Houseman et al., 1981; Houseman & Molnar, 1997)。新近提出的"两山夹一盆"的阶段生长模式 (Ding et al., 2022),认为 地壳缩短、地幔拆沉以及印度和亚洲俯冲板片发生断离的多种机制共同作用下, 造就现今的青藏高原。

当大量目光聚焦于青藏高原的过往,现代大地测量技术的快速发展为我们了 解其现今状态提供了条件,从而回答:青藏高原目前的生长和变形状态怎么样? 与印度-欧亚汇聚有怎样的关联?印度-欧亚现今的汇聚模式如何?为了回答以 上问题,中国地震局地质研究所的王丽凤研究员与南加州大学的 Sylvain Barbot 教授,采用新近发布的中国大陆水平向 GPS 速度场(Wang & Shen, 2020)和垂直 向 GPS 速度场数据(Liang et al., 2013),并结合 GSRM (https://gsrm.unavco.org/)和多个区域 GPS 网的观测,通过建立印度-欧亚 汇聚带的三维运动学模型,对以上问题进行了探讨,获得一些认识,研究结果发 表在 Nature 旗下杂志 Communications Earth & Environment(Wang & Barbot, 2023)。

研究中采用近年提出和发展的三维运动学建模方法(Barbot, 2020; Barbot & Weiss, 2021; Wang & Barbot, 2023)。该方法考虑大陆岩石圈的脆性和塑性 分层特征,从而把地表形变场刻画成脆性上地壳中沿主要断层的蠕滑和塑性下地 壳及岩石圈地幔的弥散变形。两种变形源在数值实现上分别采用弹性位错(Meade, 2007)和离散网格上的应变张量(Barbot, 2018)。类似于震后应力松弛模拟中用 地表形变观测约束下地壳和上地幔的流变特性,此处的地表形变观测则用来约束 稳态构造加载作用下的深部塑性变形。

一、三维变形特征

图 1 所示印度-欧亚汇聚带的应变张量的其中四个重要分量,表现出如下特征: (a)沿印度-欧亚汇聚方向的压缩(蓝色)作用在大部分区域,最显著的压缩发 生在喜马拉雅山脉,尤其是东构造结的南迦巴瓦。

(b)与汇聚方向的挤压相平衡,垂直于汇聚方向的变形则表现为整体拉张,除 了位于汇聚带东西边界的龙门山和兴都库什-帕米尔-天山表现为挤压。

(c)显著的水平向剪切发生在靠近东西构造结的石碣断层(SG)和帕米尔高原。 此处的负值对应南北向断层的右旋剪切或者东西向断层的左旋剪切。但这里的剪 切作用并不包括正应力作用下的纯剪过程。纯剪在阿尔金断层(ATF)的中段、 昆仑断层(KLF)和鲜水河-小江断层(XXF)较为显著(参见图2)。

(d) 垂向地壳增厚(红色)发生在汇聚带边界,从喜马拉雅山脉一直到天山-帕 米尔,以及青藏高原东北缘的祁连山和龙门山;而减薄(蓝色)过程则发生在高 原中部,包括拉萨块体、羌塘块体和部分松潘-甘孜块体,以及青藏高原东南缘 小江断层和红河断层(RRF)之间的狭长地带。

整体的应变分布(图2)沿着喜马拉雅山脉向东延伸到东构造结,直到印度 -缅甸褶皱带和石碣断层;汇聚带的西边界,从兴都库什到帕米尔一直到北天山, 都表现为应变集中区;沿着主要的走滑断层——阿尔金断层、昆仑断层、鲜水河-小江断层也表现出明显的应变集中,而海原断层(HRF)上的应变率相对较低。 主应变矢量场则表现出在汇聚边界发生明显的旋转,尤其是汇聚带的西边界——兴 都库什-帕米尔-天山,第一主应变明显偏离印度-欧亚的汇聚方向。这可能与青 藏高原西向的物质逃逸有关,致使该区域同时受到来自三个方向的挤压作用。



图 1. 印度-欧亚汇聚带的三维变形。(a)沿汇聚方向的应变率分布;(b)垂直汇 聚方向的应变率分布;(c)水平向剪切的应变率分布;(d)垂向应变率分布。图 中,研究区域的缝合线、主要走滑断层、逆冲断层、正断层或地堑裂谷分别对应 黑实线、红实线、锯齿状黑线和蓝色线条。



图 2. 应变率分布。(a) 应变总量(绝对值的和);(b) 水平向主应变的矢量场。

二、构造域特征

根据安德森断层应力模型(Anderson, 1951),不同构造域(走滑、逆冲和正断)可根据垂向主应力相对水平主应力的大小来定量,即方位因子(r)。基于塑性域的应变率与偏应力成线性,从模型得到的应变张量计算的方位因子见图 3。

整个印度-欧亚汇聚带表现为逆冲型构造域(暖色)围限拉张域(蓝色),二 者的过渡发生剪切走滑(绿色代表纯剪)。该构造域整体刻画了区域主要断层展 布:喜马拉雅主逆冲断层(MHT)、兴都库什俯冲带(MKT)、帕米尔主逆冲断层(MPT)、 南天山逆冲断层(STSF)和龙门山断层(LMSF)都位于逆冲型构造域;祁连山也 以逆冲型构造为主,与该区域密集的次一级逆断层吻合;青藏高原中部的拉张域, 分布有密集的正断层、地堑和裂谷;而阿尔金断层中段、昆仑断层、鲜水河-则 木河-小江断层、石碣断层以及喀喇昆仑断层(KRF)处于剪切走滑的构造域。



图 3. 构造域分布。根据模型获得的应变场计算的方位因子,印度-欧亚汇聚带表

现为逆冲型构造域(r<0;暖色)围限拉张域(r>1;蓝色),二者的过渡发生剪切 走滑(r=1为纯剪;绿色)。黑色箭头对代表水平向主应变。

三、滑移线分布特征

在研究青藏高原演化的历史进程中,受走滑断层控制的物质逃逸是其中重要一种变形机制(Tapponnier & Molnar, 1976)。该模型所基于的假设是在塑性条件下,当最大剪应力达到屈服强度时介质发生变形。基于这一假设,走滑断层发生在最大剪切的方位。为了验证和理解这一模型,我们以流线的形式给出两组最大剪应变的空间展布,分别对应左旋剪切(图 4a)和右旋剪切(图 4b)的滑移线。得到的左旋剪切滑移线的展布与阿尔金断层、昆仑断层、鲜水河-小江断层,以及位于西构造结的查曼断层(CMF)基本一致;右旋剪切滑移线与石碣断层、喀喇昆仑断层、塔拉斯-费尔干那断层(TFF)和博罗科努断层(BOK)的展布基本一致。如果假定脆性上地壳整体受深部塑性变形控制的话,那也意味着这些断层的摩擦系数很低。



图 4. 滑移线分布,也即最大剪切矢量场的流线表示,颜色深浅代表应变率大小。 (a) 左旋剪切滑移线;(b) 右旋剪切滑移线;(c) 和(d) 为水平向主压应变和 主张应变的流线展布。图中的双力偶震源机制解为 1970 年以来 6 级以上地震, 不同颜色分别为走滑型(红色)、逆冲型(黑色)和正断型(蓝色)地震。

此外,水平向主压应变和主张应变的展布(图4c和4d)与1970年以来6级 以上地震有很好的对应关系——逆冲型地震发生在主压应变高值区,正断型地震发 生在主张应变高值区。与图3中构造域的分布类似,印度-欧亚汇聚带的边缘以 挤压为主,而青藏高原中部以拉张为主。

上述无论从地质构造还是地震分布,都与模型构建的岩石圈塑性应变场表现 出一致性。因此,一方面模型对大地测量、地质和地震学观测给出定量解释;反 过来,模型和观测的吻合也体现了模型结果的可靠性。

四、青藏高原的现今隆升状态

基于建立的模型,我们可以进一步了解青藏高原现今的隆升状态。结果(图 5)显示,青藏高原周缘,包括喜马拉雅山脉、祁连山和龙门山,以及兴都库什、 帕米尔和天山发生隆升,隆升速率比较快的位置在南缘和西缘;而青藏高原中部, 从雅鲁藏布缝合线一直到金沙江缝合线都发生下沉,下沉速率最大的位置在班公 怒江缝合线周围。需要注意的一点是,该处给出的是相对于整个研究区域稳定的 差异隆升,也即研究区域的平均速率为0。这个结果接近于稳定蒙古框架下的速 度场(Liang et al., 2013)。绝对垂向变形的空间分布可参见图1d中的垂向应 变率。



图 5. 青藏高原及其周围的隆升速率。该垂向速度场给出的是研究区整体不动 (平均速度为0)时的差异隆升,接近于稳定蒙古框架下的速度场(Liang et al., 2013)。图中颜色代表模型预测值,三角形的颜色和大小为 GPS 观测的垂向速度 场。

五、印度-欧亚的三维汇聚特征

目前有关印度-欧亚的三维汇聚特征很大程度上依赖于地震层析成像,如图 6 中沿深度剖面的地震波速度结构分布。由这些静止的结构可推断印度板块向北 的俯冲形态和位置、亚洲板块的南向俯冲模式等。这些结构信息如果能结合动态 行为,会更好地帮助我们了解板块汇聚特征。

基于模型获得的塑性应变场,我们可以计算岩石圈的三维速率场,也即物质

运移轨迹(图6)。水平向位移场表现出物质发生南北向汇聚,同时从高原中部地 堑和裂谷密集的位置发生东西双向逃逸,但向东的逃逸速度高于向西的逃逸速度。 向东的逃逸较多发生在鲜水河-小江断层的南侧,并在石碣断层的顶端形成涡状, ——种走滑断层顶端的典型特征;而刚性塔里木盆地似乎大大降低了西向逃逸的 速度,但并没有形成完全的阻挡,意味着从这个位置的物质逃逸可能发生在刚性 块体底部的圈层。

东西向的深度剖面则表现出从高原中部向东西两侧的物质逃逸,当东西向的 逃逸遇到刚性四川盆地和塔里木盆地时,物质向深部运移。西向的逃逸在天山和 帕米尔的底部与欧亚板块形成汇聚,促使天山(沿北剖面 N2)和帕米尔(沿南剖 面 N3)向上生长。



图 6. 印度-欧亚的三维汇聚特征。(a) 水平向塑性流场,线条的颜色代表位移速度。黑色虚线对应图(b) 中一系列横切剖面的位置,共包括2条东西向剖面 N2 和 N3,9条南北向剖面 P1…P9。(b) 11条横切剖面上的物质流场分布,背景的颜色代表地震波速度结构(Li et al., 2008)。白色虚线为莫霍面的深度。



沿 P1,印度板块和 欧亚板块在兴都 库什俯冲带的下 方发生汇聚, 地壳 发生缩短,作用于 帕米尔高原的向 上生长。而地幔则 表现为向下俯冲。 从 P2 到 P4, 印度 大陆向北的汇聚 表现为地壳发生 缩短, 地幔高角度 向下俯冲; 类似的 情况发生在亚洲 板块一侧, 地壳增 生到天山底部,而 地幔以高角度向 下俯冲。

从 P5 到 P9: 印度 板块的俯冲角度 逐渐变缓。尤其是 P7和P8两个剖面, 表现为低角度的 俯冲。同时,青藏 高原物质表现为 随着印度板片的 俯冲发生下沉。在 P9 剖面, 地壳缩短 促使东构造结的 南迦巴瓦向上生 长。在亚洲板块一 侧, 亚洲板块和青 藏高原主要沿着 阿尔金断层的位 置发生直接汇聚。 到青藏高原东北 缘,二者的汇聚发 生在海原断层下 方。综上,印度-欧 亚汇聚带的整体 模式见图7。



图 7. 印度-欧亚汇聚模式。在西构造结,印度和欧亚板块在兴都库什俯冲带的下 方发生直接碰撞;沿着喜马拉雅弧,西侧的印度岩石圈地幔发生高角度向下俯冲, 地壳发生缩短;东侧的俯冲角度较缓,尤其是靠近亚东-谷露裂谷的位置,接近 于平俯冲。在青藏高原的北缘,西侧的亚洲岩石圈地幔发生高角度俯冲,而地壳 发生缩短;在东侧,亚洲板块和青藏高原沿阿尔金断层和海原断层发生直接汇聚。 当青藏高原周缘发生隆升的同时,高原中部发生地壳减薄而下沉。

致谢: 本研究得到国家自然科学基金(NSFC-41674067, NSFC-U1839211)和美国自然科学基金(EAR-1848192)的共同资助。

参考文献:

- Anderson, E. M. (1951). *The Dynamics Faulting*. London.: Oliver and Boyd.
- ARGAND, É. (1924). La tectonique de l'Asie. Proceedings of the 13th International Geological Congress, (7), 171-372.
- Barbot, S. (2018). Deformation of a Half Space from Anelastic Strain Confined in a Tetrahedral Volume. Bull. Seism. Soc. Am., 108(5A), 2687. https://doi.org/10.1785/0120180058
- Barbot, S, & Weiss, J. R. (2021). Connecting subduction, extension and shear localization across the Aegean Sea and Anatolia. *Geophysical Journal International*, 226(1), 422-445.
- Barbot, Sylvain. (2020). Mantle flow distribution beneath the California margin. Nature Communications, 11(1), 4456.
- Dewey, J. F., & Burke, K. C. \tilde{A} . (1973). Tibetan, Variscan, and

Precambrian Basement Reactivation: Products of Continental Collision. *Journal of Geology*, *81*(6), 683-692.

- Ding, L., Kapp, P., Cai, F., Garzione, C. N., Xiong, Z., Wang, H., & Wang, C. (2022). Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift. Nature Reviews Earth & Environment, 3(10), 652-667.
- 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. Geophys. Res., 86, 6115-6132.
- Houseman, Gregory A, & Molnar, P. (1997). Gravitational (Rayleigh -Taylor) instability of a layer with non-linear viscosity and convective thinning of continental lithosphere. *Geophysical Journal International*, 128(1), 125 - 150.
- Li, C., van der Hilst, R. D., Engdahl, E. R., & Burdick, S. (2008). A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(5), Q05018.
- Liang, S., Gan, W., Shen, C., Genru, X., Liu-Zeng, J., Chen, W., et al. (2013). Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements. J. Geophys. Res., 118.
- Meade, B. ~J. (2007). Algorithms for the calculation of exact displacements, strains, and stresses for triangular dislocation elements in a uniform elastic half space. *Comp. Geosc.*, 33(8), 1064 - 1075.
- Tapponnier, P, & Molnar, P. (1976). Slip line field theory and largescale continental tectonics. Nature, 264, 319-324.
- Tapponnier, Paul, Xu, Z., Roger, F., Meyer, B., Arnaud, N., Wittlinger, G., & Yang, J. (2001). Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294(5547), 1671-1677.
- Wang, L., & Barbot, S. (2023). Three-dimensional kinematics of the India - Eurasia collision. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 164. https://doi.org/10.1038/s43247-023-00815-4
- Wang, M., & Shen, Z.-K. (2020). Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived From GPS and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2), e2019JB018774. https://doi.org/10.1029/2019JB018774
- Willett, S. D., & Beaumont, C. (1994). Subduction of Asian lithospheric mantle beneath Tibet inferred from models of continental collision. *Nat*, 369(6482), 642-645.