

地震滑坡在山脉地貌演化中的作用

汪 进^{1,2}, 金章东^{1,2}

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

2. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061

构造活跃区的山脉地貌演化也是构造抬升、河流下切、气候变化和山体滑坡等过程相互作用的结果。构造抬升和河流下切作用能够导致流域起伏变大、山坡变陡, 当山坡陡峭达到重力失衡的阈值时, 形成各类大大小小的山体滑坡, 由其造成的山坡侵蚀作用能进一步限制流域的起伏 (Burbank et al, 1996; Montgomery and Brandon, 2002; Larsen and Montgomery, 2012)。因此, 在传统的“阈值”观点中, 山体滑坡可以看作是河流下切的被动反应 (Burbank et al, 1996)。然而, 滑坡体积计算和数值模拟研究却表明, 山体滑坡控制着山脉的物理侵蚀速率, 并为河流系统提供泥沙, 从而反过来调节着河流下切速率 (Hovius et al, 1997; Yanites et al, 2010; Egholm et al, 2013)。同时, 山体滑坡还可能会驱动分水岭的迁移和河流袭夺, 从而影响着流域的地貌演化 (Willett et al, 2014; Whipple et al, 2017; Dahlquist et al, 2018)。因此, 滑坡的时空分布被认为可能在构造活跃区的山脉演化中起着主要的作用 (Korup et al, 2010)。

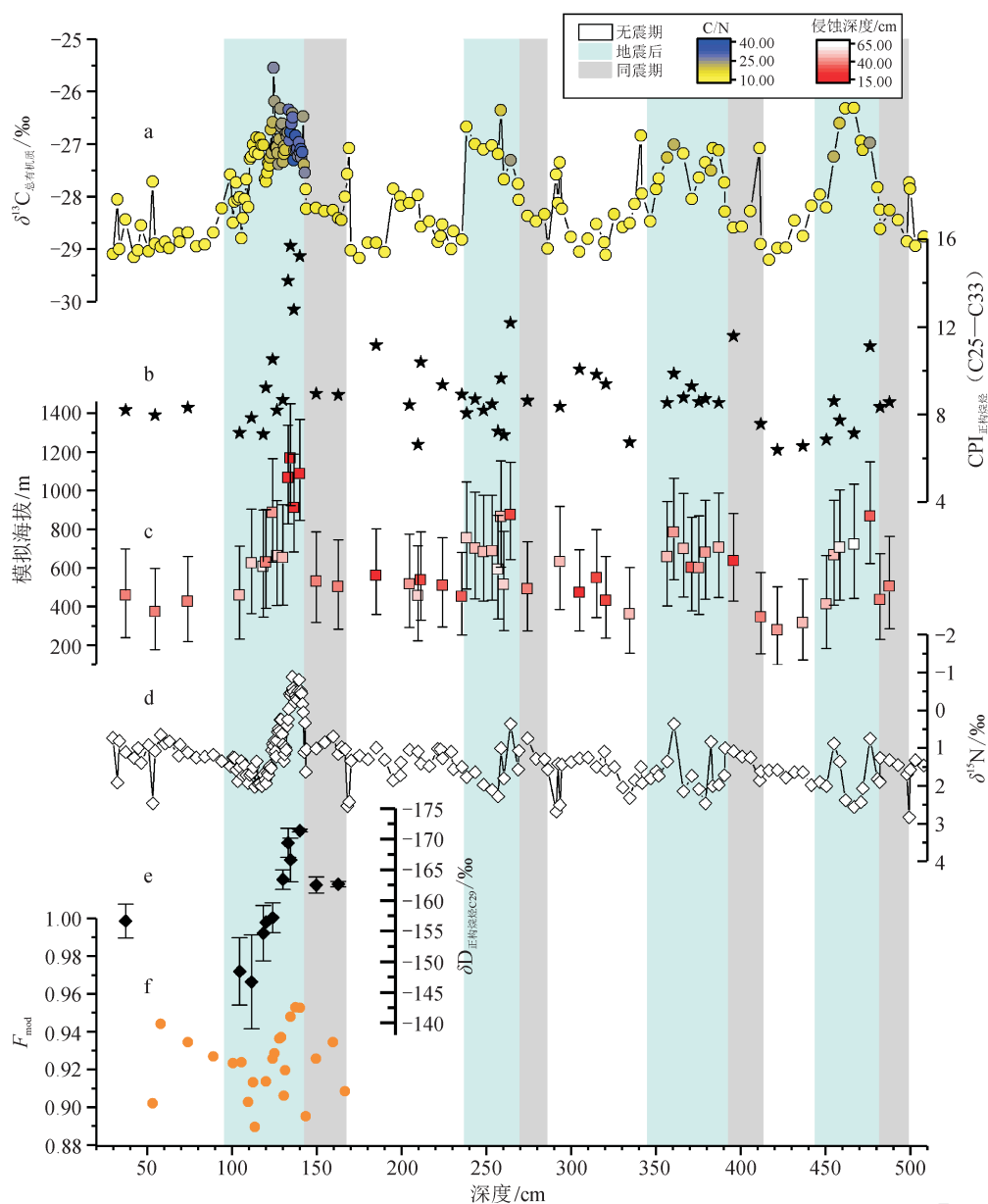
地震和强降雨能导致大量的山体滑坡发生 (Restrepo and Alvarez, 2006; Lin et al, 2008), 特别是在构造活跃区。但是, 由于发生的机制不同, 地震和强降雨造成的山体滑坡在空间分布可能存在着显著的区别或差异, 这在不同气候条件下的构造活跃区是普遍存在的 (Densmore and Hovius, 2000; Meunier et al, 2008)。那么, 这些不同成因的滑坡对山体侵蚀和山脉演化到底有什么样的影响, 其核心问题在于: 滑坡侵蚀作用到底在哪里发生? 受哪些因素控制? 长时间尺度流域侵蚀来源和通量的重建将有助于深入认识这些地表过程及其环境效应。

最近, Wang et al (2020) 利用新西兰阿尔卑斯断裂带 Paringa 湖采集的长 6 m 湖泊沉积物岩芯组成的变化, 评估了地震和强降雨滑坡各自在侵蚀和地形地貌演化中的作用。该岩芯记录了过去 1000 年以来该区域发生的四次 $M_w > 7.6$ 的地震事件。通过对该岩芯进行氮同位素 ($\delta^{15}\text{N}$)、正构烷烃 (n -alkane) 丰度及氢同位素 (δD) 的系统分析, 结合前人已发表的有机碳同位素数据 ($\delta^{13}\text{C}$, F_{mod}) (Frith et al, 2018), Wang et al (2020) 发现在每次地震发生后, 这些有机指标均发生了明显的变化 (图 1)。例如: 地震后的正构烷烃 CPI 指数 (碳优势指数) 和 $\delta^{13}\text{C}$ 有着不同程度的增加。

为了揭示岩芯记录的地震前后有机指标发生变化的原因, Wang et al (2020) 在 Paringa 湖附近的 Mountain Fox 采集了海拔 200 m 到 1200 m 之间不同深度的土壤样品, 分析了土壤中与沉积物对应的有机指标。结果发现: 这些土壤的正构烷烃的 CPI 指数和有机碳稳定碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 与土壤的海拔和深度有着很好的线性关系。基于这个关系, 计算了过去 1000 年以来 Paringa 湖泊沉积物有机质的海拔和深度变化。计算结果表明: 紧随地震后的沉积物中的有机质主要来源于 722(+329/-293) m 的高海拔地区, 而地震前沉积物中的有机质主要来源于 459(+256/-226) m 的低海拔地区。这个结果得到了 $\delta^{15}\text{N}$ 、 δD 和 F_{mod} 的进一步支持 (图 1)。根据这个差别, Wang et al (2020) 提出, 在地震发生时, 来自高海拔的有机组分是地震滑坡体侵蚀的结果, 因为地震在山脊地区有放大效应 (Hartzell et al, 2014; Massa et al, 2014), 地震滑坡体主要分布在靠近山脊的、高海拔地区 (Meunier et al, 2008; Sepúlveda et al, 2010); 而无地震时, 土壤侵蚀主要来源于低海拔地区, 这些地区由于强降雨增加孔隙流体压力也分布着不少滑坡体 (Iverson and Reid, 1992; Marc et al, 2018)。

该研究对理解构造活跃区山脉的地形演化有着重要的启示, 因为靠近山脊的地震滑坡的侵蚀能够改变包括流域分水岭位置在内的高海拔区域的地形和地貌, 因此, 除了影响流域侵蚀通量 (Wang et al, 2015)、有机碳输移 (Wang et al, 2016) 和沉积过程 (Zhang et al, 2019) 以外, 地震滑坡还可能是分

水岭迁移的重要驱动力, 而分水岭的迁移可以通过改变流域的界限和河流网络结构来影响长时间尺度上的山脉地貌演化。以往评价地震对地貌影响的研究主要是运用遥感和数值模拟, 而遥感往往只能覆盖单个事件至几十年的时间尺度, Wang et al (2020) 的研究是首次通过湖泊沉积物重建, 探讨了构造、气候极端事件对流域地貌演化的影响。因此, 该研究为地震这类极端事件在山脉的地貌演化中所起的作用提供了一个精彩的实例。



a: 稳定碳同位素比值和有机碳氮比值; b: 正构烷烃 CPI 指数; c: 模拟计算获得的沉积物侵蚀海拔及深度; d: 氮同位素比值; e: 长链正构烷烃氢同位素比值; f: 放射性碳同位素。

图1 新西兰南岛阿尔卑斯断裂带 Paringa 湖泊钻孔有机指标及海拔、深度重建 (修改自 Wang et al (2020))

致谢: 本文得到国家自然科学基金委重大项目 (41991322) 和中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB40000000) 资助。

参考文献

Burbank D W, Leland J, Fielding E, et al. 1996. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas [J].

- Nature*, 379(6565): 505–510.
- Dahlquist M P, West A J, Li G. 2018. Landslide-driven drainage divide migration [J]. *Geology*, 46(5): 403–406.
- Densmore A L, Hovius N. 2000. Topographic fingerprints of bedrock landslides [J]. *Geology*, 28(4): 371.
- Egholm D L, Knudsen M F, Sandiford M. 2013. Lifespan of mountain ranges scaled by feedbacks between landsliding and erosion by rivers [J]. *Nature*, 498(7455): 475–478.
- Frith N V, Hilton R G, Howarth J D, et al. 2018. Carbon export from mountain forests enhanced by earthquake-triggered landslides over millennia [J]. *Nature Geoscience*, 11(10): 772–776.
- Hartzell S, Meremonte M, Ramírez-Guzmán L, et al. 2014. Ground motion in the presence of complex topography: earthquake and ambient noise sources [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(1): 451–466.
- Hovius N, Stark C P, Allen P A. 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping [J]. *Geology*, 25(3): 231–234.
- Iverson R M, Reid M E. 1992. Gravity-driven groundwater flow and slope failure potential: 1. Elastic Effective-Stress Model [J]. *Water Resources Research*, 28(3): 925–938.
- Korup O, Densmore A L, Schlunegger F. 2010. The role of landslides in mountain range evolution [J]. *Geomorphology*, 120(1/2): 77–90.
- Larsen I J, Montgomery D R. 2012. Landslide erosion coupled to tectonics and river incision [J]. *Nature Geoscience*, 5(7): 468–473.
- Lin G W, Chen H, Hovius N, et al. 2008. Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(9): 1354–1373.
- Marc O, Stumpf A, Malet J P, et al. 2018. Initial insights from a global database of rainfall-induced landslide inventories: the weak influence of slope and strong influence of total storm rainfall [J]. *Earth Surface Dynamics*, 6(4): 903–922.
- Massa M, Barani S, Lovati S. 2014. Overview of topographic effects based on experimental observations: meaning, causes and possible interpretations [J]. *Geophysical Journal International*, 197(3): 1537–1550.
- Meunier P, Hovius N, Haines J A. 2008. Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(3/4): 221–232.
- Montgomery D R, Brandon M T. 2002. Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 201(3/4): 481–489.
- Restrepo C, Alvarez N. 2006. Landslides and their contribution to land-cover change in the mountains of Mexico and Central America [J]. *Biotropica*, 38(4): 446–457.
- Sepúlveda S A, Serey A, Lara M, et al. 2010. Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia [J]. *Landslides*, 7(4): 483–492.
- Whipple K X, Forte A M, DiBiase R A, et al. 2017. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: implications for the role of divide mobility in landscape evolution [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(1): 248–273.
- Wang J, Howarth J D, McClymont E L, et al. 2020. Long-term patterns of hillslope erosion by earthquake-induced landslides shape mountain landscapes [J]. *Science Advances*, 6(23): eaaz6446. DOI: 10.1126/sciadv.aaz6446.
- Wang J, Jin Z D, Hilton R G, et al. 2015. Controls on fluvial evacuation of sediment from earthquake-triggered landslides [J]. *Geology*, 43(2): 115–118.
- Wang J, Jin Z D, Hilton R G, et al. 2016. Earthquake-triggered increase in biospheric carbon export from a mountain belt [J]. *Geology*, 44(6): 471–474.
- Willett S D, McCoy S W, Perron J T, et al. 2014. Dynamic reorganization of river basins [J]. *Science*, 343(6175): 1248765.
- Yanites B J, Tucker G E, Mueller K J, et al. 2010. How rivers react to large earthquakes: evidence from central Taiwan [J]. *Geology*, 38(7): 639–642.
- Zhang F, Jin Z D, West A J, et al. 2019. Monsoonal control on a delayed response of sedimentation to the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Science Advances*, 5(6): eaav7110. DOI: 10.1126/sciadv.aav7110.