



地震滑坡在活跃造山带侵蚀和风化中的作用: 进展与展望

金章东^{1,2*}, Robert G. HILTON³, A. Joshua WEST⁴, 李根⁵, 张飞^{1,6}, 汪进^{1,6}, 李高军⁷, 范宣梅⁸, 谢孟龙⁹

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. 西安交通大学全球环境变化研究院, 西安 710049;
3. Department of Geography, Durham University, Durham DH1 3LE, UK;
4. Department of Earth Sciences, University of Southern California, Los Angeles CA 90089, USA;
5. Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena CA 91125, USA;
6. 长安大学土地工程学院, 西安 710054;
7. 南京大学地球与行星科学系, 南京 210023;
8. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;
9. 台湾中正大学地球与环境科学系, 嘉义 600

* 通讯作者, E-mail: zhdjin@ieecas.cn

收稿日期: 2021-03-24; 收修改稿日期: 2021-07-18; 接受日期: 2021-08-23; 网络版发表日期: 2021-11-29

国家自然科学基金项目(批准号: 41991322、41930864)、中国科学院前沿科学重点研究项目(编号: QYZDJ-SSW-DQC033)和中国科学院外籍青年科学家计划项目资助

摘要 以地震为代表的构造运动在地球地貌演化中起着根本性的作用, 其过程包括同震抬升或沉降和地震滑坡侵蚀。地震诱发的滑坡向河流输送大量的松散物质, 可造成流域物质输移通量成倍增加, 且持续时间可达几十年或更久。在暴露新鲜岩石的同时, 地震滑坡还剥蚀植被和土壤, 这些作用都极大地影响着区域的碳输移。越来越多的研究尝试量化地震对地表过程影响的通量、速率和演化方式, 但目前对这类高强度事件对地表过程的影响强度、幅度和趋势仍知之甚少。文章透过2008年汶川特大地震诱发的滑坡对流域侵蚀与沉积通量、河水化学和碳输移影响这一镜头, 系统综述了1999年台湾集集地震、2015年尼泊尔Gorkha地震和新西兰历史地震等对地表过程的影响, 明确了地震滑坡对构造活跃造山带流域侵蚀和风化发挥着重要作用。文章建议, 未来应加强对地震事件前后流域侵蚀-风化作用和通量的监测、地球化学示踪、沉积记录及模拟对比研究, 这不仅有助于加深高强度构造事件地表环境效应的机理认识, 而且对于阐明高强度构造事件与大陆侵蚀-风化以及长时间尺度全球碳循环之间的内在联系具有深刻科学意义。

关键词 地震, 侵蚀, 化学风化, 碳循环, 构造活跃造山带

中文引用格式: 金章东, Hilton R G, West A J, 李根, 张飞, 汪进, 李高军, 范宣梅, 谢孟龙. 2022. 地震滑坡在活跃造山带侵蚀和风化中的作用: 进展与展望. 中国科学: 地球科学, 52(2): 222–237, doi: [10.1360/N072021-0081](https://doi.org/10.1360/N072021-0081)

英文引用格式: Jin Z, Hilton R G, West A J, Li G K, Zhang F, Wang J, Li G, Fan X, Hsieh M L. 2021. The role of earthquake-induced landslides in erosion and weathering from active mountain ranges: Progress and perspectives. Science China Earth Sciences, 64(12): 2069–2082, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9832-3>

1 引言

构造活动伴随着两个重要的、相互竞争的地质过程: 一是导致地表形变的山脉隆升过程, 二是导致物质迁移的侵蚀-风化过程(如Willett等, 2001; Avouac, 2007). 这两个过程的竞争制约着构造活跃造山带的地形地貌和结构的演化(如Beaumont等, 1992; Willett, 1999), 也主导着这些体系的地球化学循环(如Raymo等, 1988; West等, 2005; Hovius等, 2011; Parker等, 2011; Li等, 2014; Marc等, 2016). 一方面, 在构造活跃造山带, 板块碰撞隆升、河流下切、基岩滑坡等相互作用塑造了其陡峭的地形(Willett等, 2014; Whipple等, 2017; Dahlquist等, 2018). 另一方面, 山脉侵蚀又通过地震破裂(Steer等, 2014)和应力均衡响应(Molnar和England, 1990)调制地壳形变的速率和方式, 进而影响全球碳循环(Raymo等, 1988; Hilton和West, 2020).

地震是地球上典型的、频繁发生的构造运动之一. 在构造活跃的造山带, 地震频发, 高强度的地震事件极大地改变着这些区域地质过程, 产生独具特色的、复杂的侵蚀、风化和沉积作用, 乃至制约着构造活跃区的侵蚀通量(Li等, 2017a; Marc等, 2019). 地震在释放板块构造累积应力的同时, 对近地表地壳结构和山区河流流域过程有一个直接的影响. 经过千年至百万年, 断裂带上叠加的地震可以影响区域尺度的地质过程. 在上地壳(几十到几百米深度), 地震能促进基岩的破碎(Molnar等, 2007; Brantley等, 2013)、改变基底的渗透性(Rojstaczer等, 1995; Xue等, 2013)、扰动水文系统(Montgomery和Manga, 2003; Skelton等, 2014; Shi等, 2015), 乃至改变化学风化过程(Jin等, 2016). 这些过程甚至能影响地表水的来源和路径, 例如震后地下水的释放可改变河水化学组成(Montgomery和Manga, 2003; Mohr等, 2015; Jin等, 2016). 在地球表层(厘米至几十米深度), 强震可诱发广泛的同震滑坡和震后滑坡(如Keefer, 1994), 这些滑坡隐藏着严重的地质灾害(Fan等, 2019). 因此, 评价地震滑坡在活跃造山带中的塑造和拆卸作用, 对更好地理解山脉的形成和地表侵蚀是十分重要的(Parker等, 2011).

尽管单次地震历时短暂、相对于人类时间尺度来说发生频率低, 但是已有研究显示强震是改变侵蚀模式和速率的主要参与者, 进而提高河流沉积物搬运和输移速率, 且影响时间可持续几年至数十年, 甚至更

长(如Koi等, 2008; Yanites等, 2010; Hovius等, 2011; Howarth等, 2012; Wang等, 2015; Li等, 2017a, 2017b; 金章东等, 2018). 最近研究表明, 强震对于长期物质输移(Densmore等, 2009; Dadson等, 2003, 2004; Wang等, 2020)和地表碳循环(Wang等, 2015, 2016; Jin等, 2016; Frith等, 2018)均有重大的影响. 这些研究促使我们需要重新认识地震滑坡在全球碳循环中的贡献(Hilton和West, 2020).

在本文中, 我们首先总结了从2008年汶川 M_w 7.9地震研究中所获得的认识. 在过去十年的研究工作中, 我们系统评估了该地震对滑坡、滑坡物质归宿、河流沉积物输移、有机碳和溶质通量的影响. 随后, 我们将这些主题置于其他情形下做了进一步讨论, 包括1999年台湾 M_w 7.6级集集地震和2015年尼泊尔 M_w 7.8级Gorkha地震事件、新西兰湖泊沉积记录的地震滑坡沉积和地震滑坡模拟等. 在总结主要进展的基础上, 我们最后提出了关于地震如何影响侵蚀、风化和生物地球化学循环过程中尚未解决的问题和可能的解决途径.

2 地震滑坡及其对地表过程的影响

强震改变着地表的物理和化学过程, 包括诱发滑坡、破碎岩石、增加大尺度的岩体渗透性和影响水文路径. 这些过程在山区产生大量的碎屑沉积物(如Keefer, 1984, 1994; Harp和Jibson, 1996; Fukuoka等, 1997; Malamud等, 2004; Jibson等, 2006; Chigira和Yagi, 2006; Sato等, 2007; Chigira等, 2010). 虽然地震本身可能不会长距离搬运沉积物, 且大多数滑坡物质以粗颗粒碎屑为主, 主要停留在山坡上(如Fan等, 2018; Croissant等, 2019), 但是越来越多的证据表明, 地震扰动可以在随后的暴雨事件期间增加滑坡量, 进而增加其后的滑坡面积比例(Chen等, 2005; Lin等, 2012; Dahlquist和West, 2019). 更重要的是, 滑坡堆积体中的细颗粒物质可以很容易地被搬运到高山河流中, 进而影响震后年至十年尺度的侵蚀通量和沉积作用(Hovius等, 2000, 2011; Larsen等, 2010; Parker等, 2011; Wang等, 2015). 活跃造山带的高侵蚀速率被认为是由地震滑坡持续提供碎屑物质的直接结果(Li等, 2017a; 金章东等, 2018; Marc等, 2019). 细致的沉积物收支研究表明, 由强烈震动产生的滑坡可以快速剥离岩石、土壤和植被, 进

而被地表径流所携带, 为河流提供物质(Keefer, 2002; Schwanghart等, 2016); 古老的滑坡也可以导致高的沉积物通量, 在盆地尺度上, 这样的影响可以持续几年至数十年(如Pearce和Watson, 1986; Koi等, 2008). 在全球尺度上, 地震造成的滑坡数量和体积与地震震级存在较好的相关性, 直接体现了地震对于地表剥蚀物质通量的控制作用(Keefer, 1994; Meunier等, 2007; Marc等, 2016; Li等, 2017a, 2017b). 地震滑坡的数量、面积、体积、物质组成、所处位置以及它们与河网系统的连通性决定着它们作为沉积物来源和行为以及滑坡对流域侵蚀的影响程度(如Keefer, 1994; Dadson等, 2004; Li等, 2016; Marc等, 2016).

构造活跃造山带的滑坡还可以深刻地控制着大河系统的河床演化(如Korup和Montgomery, 2008; Yanites等, 2010; Egholm等, 2013; Croissant等, 2017). 滑坡沉积物脉冲甚至可以在基岩快速下切河流中充填几十米(Yanites等, 2010), 进而造成河道的不稳定性, 阻碍交通、破坏水利设施, 甚至损害灾后重建工作. 例如, 由地震引发灾难性河流淤积和泥石流, 造成了喜马拉雅源头(>60km)下游数条支流的几十米厚钙质沉积物的堵塞(Schwanghart等, 2016).

在增加流域侵蚀通量的同时, 地震产生的滑坡会加速化学风化与颗粒有机碳(POC)的输移, 进而影响碳循环(如Garwood等, 1979; Jacobson等, 2003; Lyons等, 2005; Restrepo等, 2009; Hilton等, 2011; Wang等, 2016; Emberson等, 2016, 2018; Lebedeva和Brantley, 2017; Hilton和West, 2020). 因此, 深入理解流域侵蚀、风化和沉积作用在地震前后的差异, 有助于揭示这类构造事件对地表过程和碳循环在不同时间尺度上的影响.

在下面2.1~2.4节中, 我们以2008年汶川地震为视野, 总结和讨论了地震滑坡对侵蚀、沉积物与POC输移、化学风化的影响, 并强调了各个主题的核心内容.

2.1 地震滑坡增进流域侵蚀及季风在其中所起的促进作用

在构造活跃的造山带, 地震频发, 因此地震滑坡影响流域侵蚀等地表过程的监测和研究主要集中在构造活跃带, 包括喜马拉雅造山带、青藏高原东缘和太平洋沿岸地区(如日本、中国台湾中央山脉等). 这些造山带均以强烈的构造活动、陡峭地形、高地势以及高

侵蚀和高风化速率为特征(图1). 亦因这些特征, 在地震发生之前有大量的有关构造、侵蚀和风化的观测和研究, 为评估构造事件对侵蚀通量和碳循环的影响提供了背景资料和数据.

2008年5月12日的汶川 M_w 7.9级特大地震发生于青藏高原东缘的龙门山造山带. 汶川地震及余震共产生了56,000多个滑坡, 分布于龙门山脉近200km范围内的陡峭山坡(Gorum等, 2011; Li等, 2014). 自2009年12月始, 通过卓有成效的国际合作, 我们研究团队深入揭示了与2008年汶川地震及其滑坡相关的流域侵蚀变化(如West等, 2014; Li等, 2014, 2016, 2017a; Wang等, 2015).

首先, 我们利用高分辨率卫星影像, 量化了地震产生的滑坡空间分布、数量、面积和总体积, 评价了这些滑坡与河网系统的连接度, 用以理解沉积物源区行为及对流域侵蚀的贡献(Li等, 2014, 2016, 2017a). 结果表明, 地震滑坡是龙门山长期剥蚀的主要控制机制(Li等, 2017a), 并得到遥感差分数字高程模型的支持(Ren等, 2017). 与此同时, 河流泥沙中碎屑石英 ^{10}Be ($^{10}\text{Be}_{\text{qiz}}$)含量呈现明显降低, 进一步展现了地震滑坡贡献新鲜物质, 稀释沉积物组成, 增加了侵蚀通量(West等, 2014; Wang等, 2017). 然后, 我们通过对岷江、沱江、涪江三大河流16个站点地震前后每日悬浮物通量的比较, 定量了2008年汶川地震前后河流输沙量的变化. 结果表明, 相对于地震前(2006~2007年), 2008~2012年期间三条河流的输沙量增加了3~7倍(Wang等, 2015). 河流泥沙 $^{10}\text{Be}_{\text{qiz}}$ 含量变化表明, 河流推移质输送速率增加的幅度与悬浮物处于同一量级. 根据地震后三条河流的年平均输沙速率, 发现由滑坡产生的泥沙将在面积约七万平方公里的流域内停留数十到数百年, 仅仅清空<25mm细颗粒即需要 33 ± 24 年, 粗颗粒很可能持续千年以上.

1999年台湾集集地震后也监测到地震对流域侵蚀的异常影响(Dadson等, 2004; Lin等, 2008). 台湾 M_w 7.6级集集地震发生于1999年9月21日, 为过去50年来整个台湾地区震级最高的一次地震, 也是过去300~620年以来发生在车龙埔逆冲断层上最大的一次地震(Shin和Teng, 2001; Chen等, 2001). 该地震产生了超过两万个山体滑坡, 造成了当地巨大的人员伤亡和经济损失(Dadson等, 2004). 地震发生后, Dadson研究团队开展了不同时间尺度台湾地区侵蚀速率变化的研究, 数据

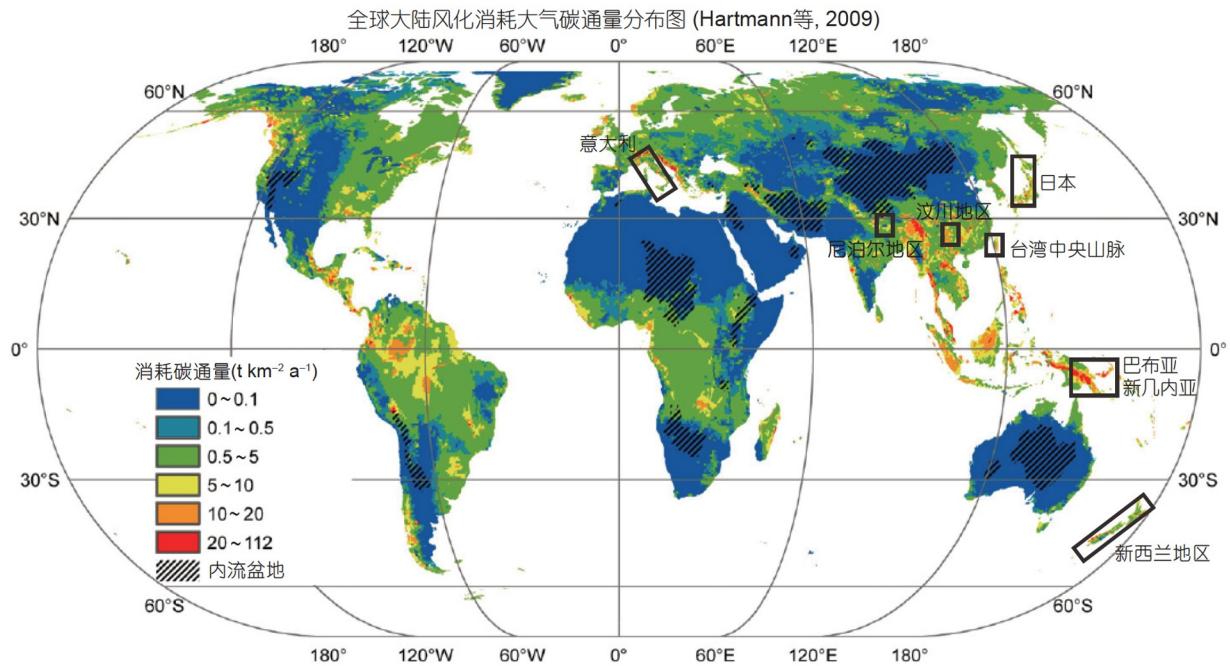


图1 全球大陆化学风化消耗大气CO₂通量空间分布和文中提到的活跃造山带

底图改自Hartmann等(2009)。文中提到的活跃造山带包括龙门山(汶川)、台湾中央山脉、高喜马拉雅(尼泊尔)、新西兰、日本、意大利和巴布亚新几内亚造山带

涵盖了从现代河流沉积物通量,到全新世河流剪切,到百万年尺度热年代学。结果显示,其活跃变形山区的侵蚀速率在所有时间尺度上都处于高值($3\sim 6\text{mm a}^{-1}$),并提出现代及十年尺度的侵蚀速率与历史地震和暴雨驱动有紧密的关联;最高的侵蚀速率发生在岩石快速变形、高暴雨频率和薄弱基底耦合之处(Dadson等, 2003)。随后,他们利用浊水溪河流悬浮物浓度变化,量化了1999年集集地震和随后台风对河流沉积物载荷的影响。对比研究发现,集集地震后,在随后台风作用下,滑坡数量和流经震中区域的河流悬浮物的浓度都显著增加,同时也增加了沉积物重密度流转运到海洋的幅度和频率(Dadson等, 2004)。而在震后四年的时间,大量的滑坡物质依然滞留山坡上,震中区域山坡上物质的损耗速率也持续处于高水平。接着, Lin等(2008)和Hovius等(2011)将陈有兰溪河流悬浮物监测数据延长至1972~2006年,以探索地震对物质平衡和地貌的影响。结果发现,地震后伴随着悬浮物浓度及通量的增加,最高达到地震前背景值的5倍,随后在6年时间内逐渐回归到震前的水平(Hovius等, 2011)。

对于汶川和台湾集集这两个地震来说,其中一个最重要的观察结果是,气候条件是地震滑坡细颗粒物

质滞留时间的关键控制因素。当同震滑坡的空间分布是一级控制时,滑坡细颗粒物滞留时间与高强度的径流事件频率成反比例关系(Dadson等, 2004; Ding等, 2014; Wang等, 2015)。与龙门山流域响应范围相比较可知,1999年集集地震后滑坡细颗粒物较短的滞留时间(Hovius等, 2011)可归因于热带气旋(台风)带来的高强度降雨。这些发现表明滑坡物质运移不但取决于流域内滑坡数量,还与每年受季风控制的高强度的径流天数紧密相关。例如,在台湾的陈有兰溪流域,约60%的年径流量是降水量每天高于5mm的降雨事件带来的,这一比例高于龙门山地区的任何流域。高强度的径流将使滑坡诱发的泥沙快速挟带、搬运和输出,特别是在具有湿润的热带/亚热带气候的台湾地区,那里的年平均降雨高达2000~4000mm,且平均每年遭遇4次台风袭击(Wu和Kuo, 1999; Hovius等, 2011)。

在上述研究实例中,均有河流悬浮物监测数据用于细致地讨论地震的影响。然而,对于如何将长时间连续监测的悬浮物变化与地震的影响相对应,却有可能变得困难起来。以集集地震为例,前人研究认为在地震后的第6年(2005年)河流悬浮物含量(SSC)逐渐回归到震前的水平(Hovius等, 2011)。然而,当我们把SSC

和径流量数据延长到2017年, 可以看到2006~2017年SSC和径流量有两次逐步衰减的变化, 且2005年以后出现了多次悬浮物的峰值(图2)。更重要的是, 这些悬浮物峰值大多数与台风和强径流同步。在集集地震前, 1996年赫伯(Herb)台风重新激活了数百个震前的滑坡, 造成了震前20年最大的洪水事件。这次洪水事件从震中流域转运出了40Mt的悬浮沉积物, 其SSC相当于震前同等径流条件下其他洪水事件的5倍(Lin等, 2008)。这突出了热带气旋事件对地震滑坡沉积物输出的重要作用。事实上, 虽然大量地震引发的滑坡物质被搬运至河流中(Li等, 2014; Wang等, 2015)或者随着极端降水事件进入海洋(Dadson等, 2004; Huang和Montgomery, 2012), 但是由1999年集集地震和2008年汶川地震引发的大量滑坡物质至今还滞留在山坡上和河道里。这意味着, 在地震后, 由地震滑坡产生的泥沙大多数会停留在山坡上, 并没有立即被带入到河流中(Hovius等, 2011)。因此, 河流悬浮物通量代表的仅仅是从震中地区带入到河流系统的、短期的净侵蚀速率, 远不是山

区滑坡物质量。这样的结果也与新西兰南阿尔卑斯断裂带由地震驱动的湖泊细颗粒沉积物记录相一致。该湖泊记录表明, 由地震增进的沉积物输入持续了约50年(Howarth等, 2012)。

高侵蚀通量与滑坡和季风降水并存的现象也出现在2015年 M_w 7.8级的Gorkha地震中。发生于2015年4月25日的尼泊尔 M_w 7.8级Gorkha地震是沿喜马拉雅边缘的最近一次强烈地震。由于活跃的构造运动和强烈的印度夏季风降雨, 喜马拉雅边缘也是以频发的地震和极多的地震滑坡为特征的(如Gerrard和Gardner, 2000; Petley等, 2007; Korup等, 2010)。该地震及其系列余震共造成了至少25,000个大大小小的滑坡体, 主要分布在尼泊尔中部陡峭的喜马拉雅高山地区(Roback等, 2018)。这些滑坡体是根据地震前后高精度的卫星图像对比获得的, 其数量、面积和体积均与前人建立的震级与滑坡关系得到的预测结果相吻合(Roback等, 2018)。一个重要的事实是, Gorkha地震产生的最高密度的滑坡主要存在于大喜马拉雅河流峡谷的低海拔地

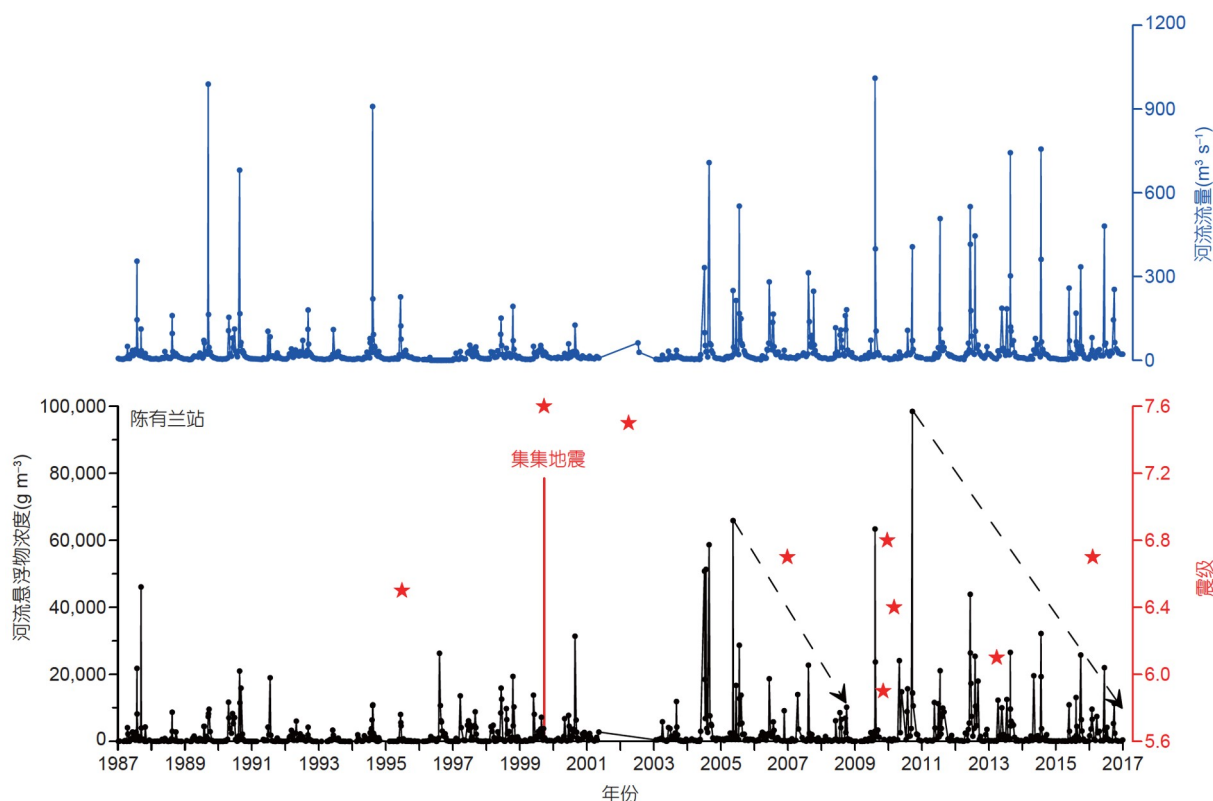


图2 1999年台湾集集地震前后浊水溪(陈有兰溪水文站)每日河流悬浮物含量和径流量变化
红色五角星标示了包括集集地震在内的震级(M_w)高于5.6的多次地震

区, 尽管高海拔地区山坡陡峭. 受控于高频率的地震破坏与印度夏季风降水径流的共同作用, 这个快速隆升山脉的剥蚀风化速度较高, 侵蚀通量较大, 意味着浅层地表的新鲜破碎物质都被快速的风化消耗或者运移(Godard等, 2014). 这些事实进一步证实, 地震诱发了非线性的泥沙动力过程, 并与喜马拉雅地区长时间尺度的沉积物收支和地球化学循环相耦合(Roback等, 2018). 其中, 季风降水起到了一个关键的作用, 它是通过风化降低表层岩石强度实现的(如Gallen等, 2015; Dahlquist和West, 2019), 此与在2008年汶川地震所得到的认识相一致(Gallen等, 2015; Li等, 2017a; Fan等, 2019).

既然地震滑坡会在随后的季风季节被重新激活并放大地表环境效应, 那么与强震紧密联系的滑坡产状和空间分布为进一步理解快速隆升造山带的同震滑坡行为及其对沉积和化学通量的影响提供了新的视角. 流域侵蚀如何响应地震事件是一个值得关注的焦点, 这也可以从2008年汶川地震后的地表环境效应中得到一些启示. 在2008年汶川地震之前, 龙门山地区构造与气候作用以及剥蚀通量(Liu-Zeng等, 2011)均不及构造抬升强烈的尼泊尔地区, 因此积累了大量剥蚀风化物质. 这些物质在汶川地震中被释放, 而后运移, 造成了侵蚀作用对强震的实质性响应(Li等, 2014, 2017a, 2017b; Wang等, 2015). 基于这些地震相关的构造活动和侵蚀/风化之间耦合关系的代表性, 我们需要深入理解地震对活跃造山带侵蚀和风化作用的影响, 特别是在喜马拉雅造山带.

2.2 地震滑坡增进有机碳侵蚀与输出

伴随着侵蚀通量的增加, 地震滑坡还会破坏山坡森林植被, 以POC的形式输移土壤和植被中的碳(Garwood等, 1979; Restrepo等, 2009; Hilton等, 2011; Wang等, 2016). 由2008年汶川地震滑坡剥蚀造成的来自植被和土壤的生物POC($\text{POC}_{\text{biosphere}}$)估计约为14Mt(Chen等, 2009). 这些 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 等同于全球河流年平均 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 输出通量的~10%(Galy等, 2015); 如果这些 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 全部被氧化, 其通量相当于每年火山释放二氧化碳的~15%. 利用2008年汶川地震前后保存的河流悬浮物样品, 我们评估了地震滑坡对河流 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 的影响(Wang等, 2016). 该研究聚焦于从杂谷脑河(岷江主要支流之一)收集的2006~2012年的悬浮物样品,

评价了POC的来源和通量变化(Wang等, 2016). 其中, $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 所占比例是通过POC含量及其 ^{13}C 和 ^{14}C 同位素比值定量获得的. 结果表明, 受2008年汶川地震诱发的滑坡影响, 河流 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 输出成倍增加. 得益于高密度的采样, 我们观测到, 紧随着该地震, 在径流量基本保持不变的情形下, 杂谷脑河的 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 浓度在2008年5月10日~15日期间增加了7倍(从 0.81 增至 6.52mgC L^{-1}). 重要的是, 在地震之后4年内, 杂谷脑下游 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 搬运通量增长率并没有呈现明显的降低趋势, 这说明由地震滑坡侵蚀的 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 输出也受控于该支流有限的径流量.

根据地震前后POC浓度和SSC之间良好的线性关系, 我们计算获得 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 年平均通量由地震前的 $(4586\pm1756)\text{tC a}^{-1}$ (2006~2007年), 增加到地震后的 $(5696\pm2645)\text{tC a}^{-1}$ (2008年5月至2011年底). $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 年通量的变化幅度与SSC变化基本相当, 且两者均与高强度的季风降雨事件相关. 为了分离地震对POC输出的影响, 我们以下游和上游 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 通量的比值对下游 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 收益率进行量化. 该收益率可解释为由地震滑坡引起的 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 侵蚀和供给的增加量. 结果显示, 即使该流域只是受到了地震滑坡的中度影响, 2008年汶川地震后的4年内, 滑坡侵蚀的POC快速进入河道, 造成杂谷脑河下游的 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 供给增加了1.4~4倍(Wang等, 2016). 地震后下游 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 收益率持续增加, 暗示着这些 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 并没有被快速氧化降解. 重要的是, 在这4年内, 杂谷脑下游 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 收益率并没有呈现明显的降低趋势, 这说明地震滑坡侵蚀的有机质供给河流搬运可能也是一个长期而缓慢的过程.

随后, 我们通过single-pool模型模拟了物理搬运和生物地球化学作用对 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 氧化降解和长期碳循环的竞争性影响, 进而讨论了地震滑坡对河流POC循环的影响. 该动力学模型计算表明, 侵蚀和河流搬运可以将来自滑坡的有机碳快速地运出流域, 而不会在山坡中被氧化. 假如不考虑POC的氧化降解(即氧化率(k)=0), 根据河流现代 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 搬运速率, 需要 85 ± 55 年才能将地震滑坡产生的全部 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 搬运出流域. 即使在一个较高的氧化降解速率下, 如在有机质翻转时间为50年(即 $k=2\%\text{ a}^{-1}$)的热带土壤情形下, 模拟结果显示, 约有60%的地震滑坡产生的 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 不会被氧化降解(Wang等, 2016). 因此, 模型模拟结果表明, 在

十年时间尺度上, 该河流搬运 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 的速率是足够快的, 致使大多数 POC (>60%) 在山坡中被氧化之前被搬运出去. 这也支持了来自其他高剥蚀速率河流体系碳输移情形的估算(如Berhe等, 2007). 根据该模型估算, 假如这部分 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 被长期保存于沉积物中, 这些 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 的输出将导致大气 CO_2 的下降, 是一个很重要的碳汇过程, 特别是对于强震后增进的 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 输移.

地震滑坡对 POC 侵蚀的更广泛作用在新西兰南阿尔卑斯断裂带也得到了深入研究. Hilton等(2008b)通过河流悬浮物有机碳氮含量及稳定碳同位素的分析, 调查研究了新西兰南阿尔卑斯山西部 POC 的来源和输移, 在那里滑坡均匀混合不同地球化学组成的坡地 POC . 研究结果显示, 在流经南阿尔卑斯山西部的河流沉积物中, 其 POC 是滑坡物质的岩石来源的化石有机碳和 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 的两端元混合产物, 在河流悬浮物中 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 占总有机碳($63 \pm 7\%$). 滑坡造成的 $\text{POC}_{\text{biosphere}}$ 的侵蚀速率相当于 $39 \text{ tC km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的大气 CO_2 转换速率, 比龙门山地区高10倍以上(Wang等, 2016, 2019). 进而, 他们利用滑坡的时空分布和现代坡地有机碳的分布密度, 进一步估算了南阿尔卑斯西部滑坡对13条河流域最近40年 POC 循环的影响(Hilton等, 2011). 估算结果显示, 滑坡侵蚀现代有机碳的速率为 $(7.6 \pm 2.9) \text{ tC km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 其中大约30%被河流搬运出去. 估算结果进一步表明, 如果这些输出的有机碳也被埋藏在沉积物中, 那么它在地质时间尺度上也将成为一个碳汇过程. 这意味着滑坡可能在较短时间尺度上(<100年)成为碳汇的贡献者. 由于南阿尔卑斯现在处于构造活动相对平静的时期(Howarth等, 2012; Robinson和Davies, 2013), 因此这个值可能低估了地震滑坡在 POC 侵蚀中的作用.

2.3 地震滑坡增进化学风化导致的溶质通量

地震可以破碎岩石, 增加十至百米深度的岩石渗透性, 促进化学风化. 已有的研究表明, 地震滑坡往往造成新鲜岩石的暴露与流体反应, 加速地表岩石的化学风化(Jacobson等, 2003; Lyons等, 2005; Guzzetti等, 2009; Emberson等, 2016; Jin等, 2016; Lebedeva和Brantley, 2017; 金章东等, 2018). 地震滑坡可诱发基岩形成大量微裂隙, 将进一步加速活跃造山带的化学风化作用.

这些认识在2008年汶川地震前后岷江河水化学变化的研究中得到了进一步证实, 揭示了地震对河水化学组成的显著影响. 河水化学变化结果显示, 汶川地震之后, 岷江输运的总溶质通量系统增加, 特别是, 与地震之前数据相比, 河水的 Na^*/Ca (Na^* 为经大气和蒸发盐校正的来自硅酸盐风化的 Na^+ 离子含量)增加了近4倍, 而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值增加了 0.000644 ± 0.000146 (Jin等, 2016). 这些变化直接揭示了汶川地震之后岷江河水中硅酸盐组分及其导致的碱度显著增加. 由此推断, 因硅酸盐组分引起的河水碱度变化计算得到的 CO_2 消耗率增加了 4.3 ± 0.4 倍(Jin等, 2016).

根据流域内地震峰值加速度(PGA)和地震形成的滑坡密度与河水化学的关系(图3a), 我们提出汶川地震之后岷江河水中硅酸盐组分和碱度的多年系统转变可能主要与震动造成的流体路径改变、由基岩破碎和包括滑坡在内的新鲜破碎岩石的快速淋滤风化有关(Jin等, 2016). 滑坡对化学风化的类似作用也存在于近期没有发生地震的坡地(Emberson等, 2016). 远离震区的河水也存在着小的化学组成变化, 这表明地震后深部地下水的释放可能是河水中高溶质通量和更多硅酸盐组分的主导因素. 我们由此进一步指出, 如果其他强震也对碳循环有类似的影响, 那么地震可能通过增进河流硅酸盐溶质输出, 将化学风化和碱度与构造活动直接联系起来.

2.4 地震滑坡对侵蚀、沉积和碳埋藏的长期影响

为了进一步探究2008年汶川地震对岷江流域侵蚀作用和沉积物搬运的影响, 我们还研究了地震前后紫坪铺沉积物组成的变化(Zhang等, 2019). 于2004年9月建成的紫坪铺水库刚好位于2008年汶川震中区的下游, 其保存的具有年分辨率的沉积物, 为完好精细地记录与汶川地震相关的沉积信息提供了独特的机会. 2016年10月, 我们从紫坪铺水库沉积中心获取了一支10.89m长的沉积岩芯, 岩芯达到了蓄水前的河床. 通过磁化率旋回与水库水位的对应关系, 建立了精确到年分辨率的沉积岩芯年代(平均沉积速率 74 cm a^{-1}), 并将2008年汶川地震的界线划定在岩芯深度的6.20m处. 基于精确的年代标尺, 利用沉积物组成和水文气象数据, 在国际上首次定量评价了单次地震和气候变化对流域侵蚀和沉积物搬运的作用.

紫坪铺水库沉积记录表明, 2008年汶川地震之后,

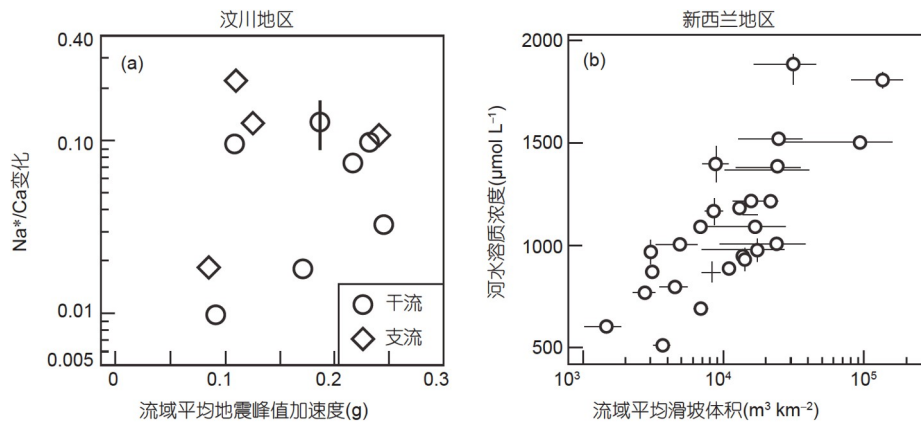


图3 河水化学与地震震动强度和滑坡体积的关系

(a) 2008年汶川地震后岷江河水 Na^*/Ca 比值与平均地震峰值加速度(PGA)的相关关系(修改自Jin等(2016)), g表示标准重力加速度; (b) 新西兰地区河流溶质浓度与滑坡容重之间的相关关系(修改自Emberson等(2016))

水库沉积物组成有一个立即的响应。最显著的地震响应信号出现在强季风径流的2010年。强季风径流有利于促进新鲜滑坡颗粒物的输出, 累积的沉积物具有粗颗粒和低Rb/Sr比值, 并持续了多年。该研究还强调指出, 地震将地表的剥蚀体系从“供应限制型”变成“搬运限制型”, 并证实地震滑坡物质的搬运与沉积主要受控于强劲的季风降雨(Zhang等, 2019)。

与紫坪铺水库研究类似, Howarth等(2012)利用新西兰南阿尔卑斯断裂带中部的一个湖泊沉积记录量化了过去1100年与5次强震事件($M_w > 7.6$)相联系的侵蚀过程。该研究认为, 阿尔卑斯断裂带的地震是南阿尔卑斯造山带侵蚀的最重要驱动力。研究发现, 在过去1100年内, 来自该湖泊流域的地震滑坡对沉积物通量的贡献为27%, 影响时间平均约为50年。进一步地, Frith等(2018)利用紧邻着阿尔卑斯断裂带的Paringa湖泊沉积物碳氮同位素组成, 揭示了同一时期4次地震滑坡的确增强了生物有机碳的侵蚀。结果显示, 地震滑坡形成的沉积物占总沉积长度的(23±5)%, 但其侵蚀的生物有机碳占(43±5)%。地球化学指标进一步显示, 这些由地震滑坡带来的有机碳主要来自高山流域源头的高海拔地区(Wang等, 2020)。最后, 滑坡模拟结果显示, 每次地震可以侵蚀(14±5)Mt的有机碳(Frith等, 2018)。这些事实进一步证实了强震能够显著地影响高山森林的碳输出, 在千年尺度上将地震事件和碳循环直接联系在了一起。

3 地震滑坡或为解开长时间尺度侵蚀-风化与构造活动的内在联系提供关键纽带

构造活动、山脉隆升、硅酸盐岩风化和气候变化之间的联系是地球科学中长期未解决的重大课题之一。由于硅酸盐岩风化是影响大气 CO_2 浓度长期变化的主导作用之一, 由喜马拉雅-青藏高原等区域构造隆升驱动的硅酸盐岩风化和大气 CO_2 消耗速率增加被认为是晚新生代以来构造驱动全球气候变冷的主因(如Raymo等, 1988; Raymo和Ruddiman, 1992; Ruddiman, 1997; Champagnac等, 2007)。“构造隆升-化学风化-气候变化”假说的提出促使以青藏高原为代表的构造隆升带的化学风化(消耗大气 CO_2)和物理剥蚀(有机碳埋藏)过程以及河流化学, 成为解决大气 CO_2 变化、晚新生代全球变冷的一个争论焦点, 各种证据和争论层出不穷(如Raymo和Ruddiman, 1992; France-Lanord和Derry, 1997; Willenbring和von Blanckenburg, 2010; Torres等, 2014)。在本节中, 我们在剖析与“构造隆升-化学风化-气候变化”假说相关的各类过程、挑战和争论的基础上, 提出地震诱发的滑坡可能作为长期侵蚀-风化与构造之间内在联系的关键纽带。

3.1 构造-气候争论的根源

迄今, 晚新生代以来全球气候变冷到底受“构造驱动”, 还是“气候反馈”控制, 仍然是地球科学的一个争论的热点。其争论的焦点在于: (1) 构造运动以何种机

制影响剥蚀、风化和碳埋藏, (2) 它们是如何与气候变化形成互馈的(West, 2012; Ferrier等, 2013; Maher和Chamberlain, 2014; Murphy等, 2016). 在此我们提出, 造成争论的主要原因之一是晚新生代以来的风化记录的研究主要集中于海洋沉积物的信息提取和解释, 或基于短时间尺度(月至年级)河水化学的现代过程研究. 海洋沉积物均来自不同地质和气候带、各种岩石类型剥蚀风化的混合产物. 这样的混合产物可能相互抵消了区域构造及气候因素的影响, 并且易受生物扰动(Romans等, 2016). 因此, 低沉积速率的海洋沉积物难以重建高分辨率风化指标历史. 更重要的是, 长尺度构造事件总是伴随着水文气候变化, 因此很难分离构造运动对侵蚀和风化过程的影响, 由此对于重大构造事件前后地质数据的解释存在较多不确定性. 对于现代河水化学而言, 即使在构造隆升造山带河水中有较高的硅酸盐风化贡献(如Bluth和Kump, 1994; White和Blum, 1995), 也难以通过河水化学变化评估构造或气候对全球尺度剥蚀和风化通量的相对贡献量(Peucker-Ehrenbrink等, 1995).

于此, 评估构造或气候对剥蚀和风化通量的相对贡献量的一个直接解决方法是开展单一构造事件(如地震)前后地表化学风化和剥蚀作用的对比研究. 通过一次事件前后流域侵蚀与风化强度和通量及其碳消耗的比较, 可以更好地理解构造运动对单一流域地表过程影响的强度、幅度和范围, 乃至持续的时间. 如上所述, 如强震之类的高强度事件对河流系统的主要活性和物理特性有重要的影响, 且主要通过滑坡的方式. 然而, 由于强震具有偶然性、极低的发生频次(回归时间大于百年), 加之往往缺乏事件之前的样品或数据, 因此这类高强度事件如何影响侵蚀-风化过程和通量仍是我们认识长时间尺度山地剥蚀、沉积物形成及碳循环一个关键缺失环节. 与构造事件相关的碳收支也是目前全球碳循环研究和气候变化模型中最不确定的部分.

3.2 洞悉地震滑坡过程及机制的意义

如上所述, 在构造活跃造山带, 流域侵蚀和风化作用与地震诱发的滑坡之间存在直接联系. 例如, 河流悬浮物通量及其降低的 ^{10}Be 显示了震后新鲜物质侵蚀的增强, 新鲜的滑坡物质快速进入河流运输体系(West等, 2014; Wang等, 2015, 2017; Li等, 2016, 2017a, 2017b, 2018); 河水化学溶质和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的显著增

加(图3)是地震造成的深部地下水的混入或/和新鲜滑坡物质风化增强的结果(Embersen等, 2016; Jin等, 2016; 金章东等, 2018). 然而, 由地震滑坡造成的化学风化速率、通量和机制均缺乏理解. 这意味着强震对地表系统的影响, 需要对地震参数和震后地表过程做进一步的监测和模拟. 事实上, 地震滑坡的影响已经成为地表过程领域的一个前沿方向. 例如, 在欧洲地球物理联合会(EGU)召开的第六届伽利略会议上设立了“Perturbations of earth surface dynamics caused by extreme events(极端事件造成的地表系统扰动)”专题. 与该会议相联系, 德国波茨坦地学研究中心(GFZ)展开了本文讨论的各个主题的长时间、全方位、高密度的监测. 其中, 他们详细展示了2016年7月尼泊尔-喜马拉雅地区一次灾难性的湖泊溃决洪水事件对Bhote Kosi河流域的影响, 该流域位于受2015年Gorkha地震强烈震动和滑坡影响的区域内(如Cook等, 2018). 另外, 一支来自瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH)的研究团队也在对2015年Gorkha地震之后河流沉积物和有机碳运移进行监测(Märki等, 2018).

迄今, 对地震引发的滑坡如何影响流域侵蚀和风化过程面临的主要科学问题包括: (1) 地震造成的巨量滑坡物质产生沉积物的速率和通量有多大? (2) 这些沉积物如何进入河流, 并最终如何被河流系统转运出去? (3) 地震滑坡如何通过有机碳侵蚀和搬运, 及其产生的新鲜岩石如何影响风化和碳循环? (4) 地震滑坡到底能产生多大程度上的地表剥蚀风化强度的变化, 并持续多长时间? (5) 在滑坡影响流域内, 侵蚀和化学风化速率的耦合关系如何? 没有这些方面的认识, 很难去评估地质时间尺度上的构造运动对地表侵蚀-风化强度及二氧化碳消耗的影响. 特别是, 在构造活跃造山带, 地震滑坡与风化和侵蚀速率之间耦合关系如何, 还缺乏认识; 其与水文气候变化的关系更是阻碍着我们理解长时间尺度山地侵蚀与 CO_2 消耗之间的内在联系. 例如, 河流清空滑坡物质的时间尺度及机制还所知甚少, 但这对于提取沉积记录中地震信号和解译侵蚀与构造作用的耦合关系至关重要. 为了更好地理解事件前后地球物理和地球化学组成的差异, 需要利用新的载体、方法和手段去深入研究, 如一些方兴未艾的非传统稳定同位素(Teng等, 2019)以及堰塞湖、水库和附近湖泊中的沉积记录.

在新兴的同位素示踪剂中, Mg和U同位素在示踪

地表侵蚀和风化速率方面极具潜力(Pelt等, 2008; Ma等, 2010, 2015). 在化学风化和次生碳酸盐矿物形成过程中, Mg同位素易发生分馏, 即在岩石风化时, 轻的同位素会流失, 而重的同位素留在风化壳中, 风化越强烈, 风化壳的Mg同位素越重(Teng等, 2010; Wimpenny等, 2014). 从理论上来说, 震前的沉积物由于经历了较长时间的风化, 应比震后滑坡物质具有更高的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值, 因为地震滑坡暴露了大量新鲜未风化的岩石. 因此, 通过对比地震前后河流悬浮物中Mg同位素的差异, 可评价极端构造事件前后地表风化强度的变化.

同时, 近几年铀(U)系同位素作为新的地球化学示踪剂研究化学风化过程得到快速发展, 并已表明在高侵蚀的构造活跃造山带风化通量由滑坡风化主导(Li等, 2018). 因为由 ^{238}U 衰变形成 ^{234}U 又会衰变成 ^{230}Th , 新鲜未风化岩石中 ^{234}U 和 ^{238}U 活度比处于长期平衡, 其比值(表示为 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$)为1.0. 随着碎屑物的侵蚀、破碎和风化, 碎屑颗粒中的 ^{234}U 和 ^{238}U 的平衡状态被破坏, 导致 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ 逐渐降低. 平衡的破坏是由于 ^{234}U 的优先流失, 其机制是 ^{238}U 在 α 衰变过程中释放的能量将颗粒表面 ^{234}U 的母体 ^{234}Th 弹射出体系外, 进而导致体系内 ^{234}U 累积量减少(Kigoshi, 1971; DePaolo等, 2006), 或者赋存在放射性破坏晶格中的 ^{234}U 选择性溶解(Fleischer, 1980, 1982). 随着风化的进行, 这种弹射效应不断累积, 即风化层暴露时间越长, ^{234}U 弹射流失累积量越高, $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ 越低(DePaolo等, 2006; Vigier等, 2006). 由此, 河水和沉积物的 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ 比值可以反映碎屑物质所经历的风化时间(t). 将 t 与流域侵蚀速率(D)相结合可以获得风化层的厚度(H), 即 $t=H/D$. 通过河水 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{riv}}$ 与 D 的拟合结果发现, 在侵蚀速率高达 $>0.09\text{mm a}^{-1}$ 的流域风化界面平均暴露深度居然达约10m(图4)(Li等, 2018). 对于分布着薄土壤层的高速侵蚀区, 约10m厚的风化层与滑坡造成的基岩微裂隙尺度基本相当(Embersen等, 2018), 即这些山区的侵蚀速率受控于滑坡裂隙. 于此, 通过对比地震前后河流悬浮物和河水 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ 的差异, 可评价构造事件前后悬浮物和溶解物的来源及其随着搬运时间的变化, 有望为那些由巨量滑坡物质主导的流域风化通量的变化提供线索.

3.3 来自沉积记录的洞察

与沿着新西兰南阿尔卑斯断裂带的湖泊沉积岩芯

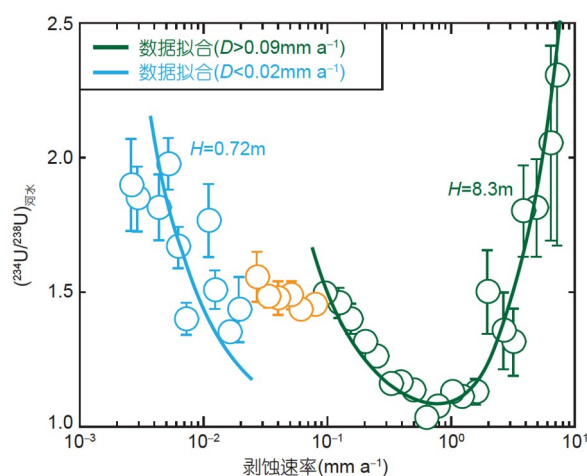


图4 河流溶解态 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ 比值与流域剥蚀速率(D)的相关关系

显示高剥蚀率地区的高风化深度(H)可能与滑坡相联系(修改自Li等(2018)). 蓝色曲线: 剥蚀速率(D)小于 0.02mm a^{-1} 拟合曲线; 绿色曲线: D 大于 0.09mm a^{-1} 拟合曲线, 接近于滑坡的尺度. 拟合未包括中等剥蚀速率($0.02\text{mm a}^{-1} < D < 0.09\text{mm a}^{-1}$)黄色点

类似(Howarth等, 2012; Frith等, 2018), 在震区内堰塞湖、湖泊和水库沉积序列也能记录事件前后流域侵蚀和风化过程的变化(Koi等, 2008; Zhang等, 2019; Fan等, 2020). 与沉积速率、水文和滑坡资料相结合, 这些沉积序列的物理和地球化学组成变化可以用来示踪地震事件前后侵蚀、风化、有机质来源和输移的差异, 及其它它们之间的相互联系.

4 结语与展望

4.1 总结

强震广泛发生于构造活跃造山带, 是以大量同震和震后滑坡为特征的. 越来越多的研究表明, 地震作为一个关键的地质营力, 其造成的滑坡对流域侵蚀、风化和碳循环有着直接而深远的影响. 这一事实的有力证据来自于近几十年各国科学家对1999年台湾集集地震、2008年汶川地震、2015年尼泊尔Gorkha地震和新西兰历史地震等前后流域地貌、沉积、地球化学和水文变化的研究. 强震可导致地表剥蚀系统类型从“供应限制型”向“搬运限制型”体制的巨大转变(Zhang等, 2019), 使得河流沉积物和溶质通量比正常情形下的要高几倍, 乃至一个数量级(Wang等, 2015; Jin等, 2016), 这种影响时间可持续几年至数百(年)(Pearce和Watson,

1986; Koi等, 2008; Hovius等, 2011; Howarth等, 2012). 与上文的实例类似, 有关1923年日本7.9级Kanto地震(Koi等, 2008)、1993年巴布亚新几内亚的6.9级Finisterre地震(Stevens等, 1998)、2004年日本6.6级Niigata地震(Hikima和Koketsu, 2005)和2008年日本6.8级Iwate地震(Suzuki等, 2010)等地震滑坡演化的研究也都显示地震滑坡衰变时间大致与地震级别成比例变化, 其震后滑坡发生均与某一时段的累积降雨量有直接关联(Marc等, 2015). 根据103个流域年到十年尺度沉积物产率的空间分布模式发现, 整个意大利沉积物产率也与地震震级紧密相关(Vanmaercke等, 2017). 进一步地, 在地震滑坡高密度区及地震高烈度区, 因岩体的破碎裂隙和新鲜岩石碎屑的暴露, 近地表岩石的物理侵蚀和化学风化都得到很大程度的增强(Calmels等, 2011; West, 2012; Maher和Chamberlain, 2014). 与此同时, 强震在河流输运和有机碳埋藏方面也起着重要的作用. 例如, 如果高于10~40%的由地震滑坡侵蚀的POC被沉积物埋藏(Hilton等, 2008a, 2011; Wang等, 2016, 2019; Frith等, 2018), 那么这个过程将是构造活跃造山带消耗大气CO₂最重要的方式. 地震滑坡通过增加硅酸盐风化消耗CO₂(如Jin等, 2016)和有机碳埋藏(Wang等, 2016)两个作用将构造运动与CO₂下降直接联系起来, 这为造山运动、侵蚀和风化与全球碳循环的联系提供了一个有效机制(Raymo和Ruddiman, 1992; France-Lanord和Derry, 1997; Hilton和West, 2020). 因此, 地震滑坡引发的侵蚀和风化通量的增加为认识构造事件对地表侵蚀风化的决定作用提供了新见解, 可能成为验证“构造隆升-化学风化-气候变化”假说的一个关键纽带.

4.2 未来展望

然而, 由于强震的发生具有频率低和不可预测性, 这类高强度事件对物理剥蚀、化学风化过程和通量, 以及有机碳的搬运、氧化及埋藏的影响, 还需加以进一步的评估. 综合以上已有研究可见, 地震滑坡密度和径流强度是决定地震滑坡影响河流系统持续时间的关键因素. 汶川地震前后河水化学变化研究表明, 构造活动的变化具有增加河流碱度潜力(Jin等, 2016), 其长期影响强度将取决于震后效应持续时间的长短和不同地震导致的化学变化的幅度. 这样的影响还与很多因素相关, 包括地震震级、地震频率幅度及回归时间、

滑坡量、破碎带状态、水文、区域岩性和水文气候事件等. 降雨事件(如台风、暴雨、洪水)对滑坡物质搬运的作用已在大多数地震之后所观测到(Hovius等, 2000; Koi等, 2008; Wang等, 2016; Zhang等, 2019), 尽管其背后的机制还有待深入的理解. 这些问题的解答有待于进一步调研, 包括不同地震造成的变化幅度和持续时间如何变化以及造成这些变化的背后机制的理解. 于此, 我们需要一些示踪极端事件(如强震、台风)对地表侵蚀和地形地貌演化影响的直接而有效手段, 包括: (1) 监测河流悬浮物和水文参数变化, (2) 评价滑坡数量和体积变化的第一手资料, (3) 比较流域内沉积物产率的空间差异, (4) 在事件影响区域获得滑坡分布变化的时间序列或从堰塞湖和水库沉积物中获得侵蚀-风化产物的沉积信号. 对于缺乏监测数据的地区, 借助高分辨率卫星影像数据进行事件前后的对比, 也能获得一些重要信息.

从科学上来说, 除了研究更多案例获得更多数据外, 全面地理解地震滑坡对构造活跃造山带侵蚀-风化的影响还可以通过以下手段达到: 选择典型地震事件, (1) 对河流系统开展水文、地貌、生物和地球化学参数长期而持续的监测, (2) 利用新型手段示踪地震事件后的累积效应对比, (3) 从史前事件沉积评估地震前后沉积特征的变化. 如此全面的机制理解不仅对于进一步阐明构造活动影响下的不同时间尺度侵蚀-风化-碳循环耦合机制具有深刻的科学意义, 而且能为验证“构造隆升-化学风化-气候变化”假说提供直接而有力的证据.

致谢 南京大学李来峰博士和成都理工大学苟龙飞博士在文稿撰写过程中提供帮助和有益讨论. 责任编辑和匿名审稿人提出建设性建议, 在此一并致谢.

参考文献

- 金章东, 汪进, 李根, 张飞. 2018. 大地震对龙门山构造带剥蚀-风化-碳循环的深远影响. 第四纪研究, 38: 261–272
- Avouac J P. 2007. Dynamic processes in extensional and compressional settings-mountain building: From earthquakes to geological deformation. In: Watts A B, ed. Crustal and Lithosphere Dynamics. Treatise on Geophysics, 6: 377–439
- Beaumont C, Fullsack P, Hamilton J. 1992. Erosional control of active compressional orogens. In: McClay K R, ed. Thrust Tectonics. New

- York: Chapman and Hall. 19–31
- Berhe A A, Harte J, Harden J W, Torn M S. 2007. The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink. *Bioscience*, 57: 337–346
- Bluth G J S, Kump L R. 1994. Lithologic and climatologic controls of river chemistry. *Geochim Cosmochim Acta*, 58: 2341–2359
- Brantley S L, Holleran M E, Jin L, Bazilevskaya E. 2013. Probing deep weathering in the Shale Hills Critical Zone Observatory, Pennsylvania (USA): The hypothesis of nested chemical reaction fronts in the subsurface. *Earth Surf Process Landforms*, 38: 1280–1298
- Calmels D, Galy A, Hovius N, Bickle M J, West A J, Chen M C, Chapman H. 2011. Contribution of deep groundwater to the weathering budget in a rapidly eroding mountain belt, Taiwan. *Earth Planet Sci Lett*, 303: 48–58
- Champagnac J D, Molnar P, Anderson R S, Sue C, Delacou B. 2007. Quaternary erosion-induced isostatic rebound in the western Alps. *Geology*, 35: 195–198
- Chen W S, Chen Y G, Chang H C, Lee Y H, Lee J C. 2001. Palaeoseismic study of the Chelungpu fault in the Wanfung area. *Western Pacific Earth Sci*, 1: 499–506
- Chen R F, Chan Y C, Angelier J, Hu J C, Huang C, Chang K J, Shih T Y. 2005. Large earthquake-triggered landslides and mountain belt erosion: The Tsaoling case, Taiwan. *Comptes Rendus Geosci*, 337: 1164–1172
- Chen H, Wu N, Yuan X, Gao Y, Zhu D. 2009. Aftermath of the Wenchuan earthquake. *Front Ecol Environ*, 7: 72
- Chigira M, Yagi H. 2006. Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan. *Eng Geol*, 82: 202–221
- Chigira M, Wu X, Inokuchi T, Wang G. 2010. Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Geomorphology*, 118: 225–238
- Cook K L, Andermann C, Gimbert F, Adhikari B R, Hovius N. 2018. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. *Science*, 362: 53–57
- Croissant T, Lague D, Steer P, Davy P. 2017. Rapid post-seismic landslide evacuation boosted by dynamic river width. *Nat Geosci*, 10: 680–684
- Croissant T, Steer P, Lague D, Davy P, Jeandet L, Hilton R G. 2019. Seismic cycles, earthquakes, landslides and sediment fluxes: Linking tectonics to surface processes using a reduced-complexity model. *Geomorphology*, 339: 87–103
- Dadson S J, Hovius N, Chen H, Dade W B, Hsieh M L, Willett S D, Hu J C, Horng M J, Chen M C, Stark C P, Lague D, Lin J C. 2003. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, 426: 648–651
- Dadson S J, Hovius N, Chen H, Dade W B, Lin J C, Hsu M L, Lin C W, Horng M J, Chen T C, Milliman J, Stark C P. 2004. Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt. *Geology*, 32: 733–736
- Dahlquist M P, West A J. 2019. Initiation and runout of post-seismic debris flows: Insights from the 2015 Gorkha Earthquake. *Geophys Res Lett*, 46: 9658–9668
- Dahlquist M P, West A J, Li G. 2018. Landslide-driven drainage divide migration. *Geology*, 46: 403–406
- Densmore A L, Hetzel R, Ivy-Ochs S, Krugh W C, Dawers N, Kubik P. 2009. Spatial variations in catchment-averaged denudation rates from normal fault footwalls. *Geology*, 37: 1139–1142
- DePaolo D J, Maher K, Christensen J N, McManus J. 2006. Sediment transport time measured with U-series isotopes: Results from ODP North Atlantic drift site 984. *Earth Planet Sci Lett*, 248: 394–410
- Ding H, Li Y, Ni S, Ma G, Shi Z, Zhao G, Yan L, Yan Z. 2014. Increased sediment discharge driven by heavy rainfall after Wenchuan earthquake: A case study in the upper reaches of the Min River, Sichuan, China. *Quat Int*, 333: 122–129
- Egholm D L, Knudsen M F, Sandiford M. 2013. Lifespan of mountain ranges scaled by feedbacks between landsliding and erosion by rivers. *Nature*, 498: 475–478
- Embersson R, Hovius N, Galy A, Marc O. 2016. Chemical weathering in active mountain belts controlled by stochastic bedrock landsliding. *Nat Geosci*, 9: 42–45
- Embersson R, Galy A, Hovius N. 2018. Weathering of reactive mineral phases in landslides acts as a source of carbon dioxide in mountain belts. *J Geophys Res-Earth Surf*, 123: 2695–2713
- Fan X, Domènech G, Scaringi G, Huang R, Xu Q, Hales T C, Dai L, Yang Q, Francis O. 2018. Spatio-temporal evolution of mass wasting after the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake revealed by a detailed multi-temporal inventory. *Landslides*, 15: 2325–2341
- Fan J, Jiang H, Shi W, Guo Q, Zhang S, Wei X, Xu H, Zhong N, Huang S, Chang X, Xiao J. 2020. A 450-year lacustrine record of recurrent seismic activities around the Fuyun fault, Altay Mountains, Northwest China. *Quat Int*, 558: 75–88
- Fan X, Scaringi G, Korup O, West A J, van Westen C J, Tanyas H, Hovius N, Hales T C, Jibson R W, Allstadt K E, Zhang L, Evans S G, Xu C, Li G, Pei X, Xu Q, Huang R. 2019. Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts. *Rev Geophys*, 57: 421–503
- Ferrier K L, Huppert K L, Perron J T. 2013. Climatic control of bedrock river incision. *Nature*, 496: 206–209
- Fleischer R L. 1980. Isotopic disequilibrium of uranium: Alpha-recoil damage and preferential solution effects. *Science*, 207: 979–981
- Fleischer R L. 1982. Alpha-recoil damage and solution effects in minerals: Uranium isotopic disequilibrium and radon release.

- Geochim Cosmochim Acta*, 46: 2191–2201
- France-Lanord C, Derry L A. 1997. Organic carbon burial forcing of the carbon cycle from Himalayan erosion. *Nature*, 390: 65–67
- Frith N V, Hilton R G, Howarth J D, Gröcke D R, Fitzsimons S J, Croissant T, Wang J, McClymont E L, Dahl J, Densmore A L. 2018. Carbon export from mountain forests enhanced by earthquake-triggered landslides over millennia. *Nat Geosci*, 11: 772–776
- Fukuoka H, Sassa K, Scarascia-Mugnozza G. 1997. Distribution of landslides triggered by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake and long runout mechanism of the Takarazuka Golf Course Landslide. *J Phys Earth*, 45: 83–90
- Gallen S F, Clark M K, Godt J W. 2015. Coseismic landslides reveal near-surface rock strength in a high-relief, tectonically active setting. *Geology*, 43: 11–14
- Galy V, Peucker-Ehrenbrink B, Eglinton T. 2015. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion. *Nature*, 521: 204–207
- Garwood N C, Janos D P, Brokaw N. 1979. Earthquake-caused landslides: A major disturbance to tropical forests. *Science*, 205: 997–999
- Gerrard J, Gardner R A M. 2000. Relationships between rainfall and landsliding in the Middle Hills, Nepal. *Norw J Geol*, 54: 74–81
- Godard V, Bourles D L, Spinabella F, Burbank D W, Bookhagen B, Fisher G B, Moulin A, Leanni L. 2014. Dominance of tectonics over climate in Himalayan denudation. *Geology*, 42: 243–246
- Gorum T, Fan X, van Westen C J, Huang R Q, Xu Q, Tang C, Wang G. 2011. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology*, 133: 152–167
- Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, Rossi M, Valigi D. 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, Central Italy. *Earth Planet Sci Lett*, 279: 222–229
- Harp E L, Jibson R W. 1996. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake. *Bull Seismol Soc Am*, 86: S319–S332
- Hartmann J, Jansen N, Dürr H H, Kempe S, Köhler P. 2009. Global CO₂-consumption by chemical weathering: What is the contribution of highly active weathering regions? *Glob Planet Change*, 69: 185–194
- Hikima K, Koketsu K. 2005. Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A series of events in a complex fault system. *Geophys Res Lett*, 32: L18303
- Hilton R G, Galy A, Hovius N, Chen M C, Horng M J, Chen H. 2008a. Tropical-cyclone-driven erosion of the terrestrial biosphere from mountains. *Nat Geosci*, 1: 759–762
- Hilton R G, Galy A, Hovius N. 2008b. Riverine particulate organic carbon from an active mountain belt: Importance of landslides. *Glob Biogeochem Cycle*, 22: GB1017
- Hilton R G, Meunier P, Hovius N, Bellingham P J, Galy A. 2011. Landslide impact on organic carbon cycling in a temperate montane forest. *Earth Surf Process Landforms*, 36: 1670–1679
- Hilton R G, West A J. 2020. Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 284–299
- Hovius N, Meunier P, Lin C W, Chen H, Chen Y G, Dadson S, Horng M J, Lines M. 2011. Prolonged seismically induced erosion and the mass balance of a large earthquake. *Earth Planet Sci Lett*, 304: 347–355
- Hovius N, Stark C P, Chu H-T, Lin J-C. 2000. Supply and removal of sediment in a landslide-dominated mountain belt: Central range, Taiwan. *J Geol*, 108: 73–89
- Howarth J D, Fitzsimons S J, Norris R J, Jacobsen G E. 2012. Lake sediments record cycles of sediment flux driven by large earthquakes on the Alpine fault, New Zealand. *Geology*, 40: 1091–1094
- Huang M Y F, Montgomery D R. 2012. Fluvial response to rapid episodic erosion by earthquake and typhoons, Tachia River, central Taiwan. *Geomorphology*, 175–176: 126–138
- Jacobson A D, Blum J D, Chamberlain C P, Craw D, Koons P O. 2003. Climatic and tectonic controls on chemical weathering in the New Zealand Southern Alps. *Geochim Cosmochim Acta*, 67: 29–46
- Jibson R W, Harp E L, Schulz W, Keefer D K. 2006. Large rock avalanches triggered by the M 7.9 Denali Fault, Alaska, earthquake of 3 November 2002. *Eng Geol*, 83: 144–160
- Jin Z, West A J, Zhang F, An Z, Hilton R G, Yu J, Wang J, Li G, Deng L, Wang X. 2016. Seismically enhanced solute fluxes in the Yangtze River headwaters following the A.D. 2008 Wenchuan earthquake. *Geology*, 44: 47–50
- Keefer D K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geol Soc Am Bull*, 95: 406–421
- Keefer D K. 1994. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions. *Geomorphology*, 10: 265–284
- Keefer D K. 2002. Investigating landslides caused by earthquakes—A historical review. *Surveys Geophys*, 23: 473–510
- Kigoshi K. 1971. Alpha-recoil thorium-234: Dissolution into water and the uranium-234/uranium-238 disequilibrium in nature. *Science*, 173: 47–48
- Koi T, Hotta N, Ishigaki I, Matuzaki N, Uchiyama Y, Suzuki M. 2008. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: The Tanzawa region, Japan. *Geomorphology*, 101: 692–702
- Korup O, Montgomery D R. 2008. Tibetan plateau river incision

- inhibited by glacial stabilization of the Tsangpo gorge. *Nature*, 455: 786–789
- Korup O, Montgomery D R, Hewitt K. 2010. Glacier and landslide feedbacks to topographic relief in the Himalayan syntaxes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107: 5317–5322
- Larsen I J, Montgomery D R, Korup O. 2010. Landslide erosion controlled by hillslope material. *Nat Geosci*, 3: 247–251
- Lebedeva M I, Brantley S L. 2017. Weathering and erosion of fractured bedrock systems. *Earth Surf Process Landforms*, 42: 2090–2108
- Li L, Chen J, Chen T, Chen Y, Hedding D W, Li G, Li L, Li T, Robinson L F, West A J, Wu W, You C F, Zhao L, Li G. 2018. Weathering dynamics reflected by the response of riverine uranium isotope disequilibrium to changes in denudation rate. *Earth Planet Sci Lett*, 500: 136–144
- Li G, West A J, Densmore A L, Jin Z, Parker R N, Hilton R G. 2014. Seismic mountain building: Landslides associated with the 2008 Wenchuan earthquake in the context of a generalized model for earthquake volume balance. *Geochem Geophys Geosyst*, 15: 833–844
- Li G, West A J, Densmore A L, Hammond D E, Jin Z, Zhang F, Wang J, Hilton R G. 2016. Connectivity of earthquake-triggered landslides with the fluvial network: Implications for landslide sediment transport after the 2008 Wenchuan earthquake. *J Geophys Res-Earth Surf*, 121: 703–724
- Li G, West A J, Densmore A L, Jin Z, Zhang F, Wang J, Clark M, Hilton R G. 2017a. Earthquakes drive focused denudation along a tectonically active mountain front. *Earth Planet Sci Lett*, 472: 253–265
- Li G, West A J, Densmore A L, Jin Z, Zhang F, Wang J, Hilton R G. 2017b. Distribution of earthquake-triggered landslides across landscapes: Towards understanding erosional agency and cascading hazards. In: Li Y, ed. *Fault-Zone Guided Wave, Ground Motion, Landslide and Earthquake Forecast*. Berlin, Boston: De Gruyter. 160–190
- Lin G W, Chen H, Hovius N, Horng M J, Dadson S, Meunier P, Lines M. 2008. Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment. *Earth Surf Process Landforms*, 33: 1354–1373
- Lin G W, Chen H, Shih T Y, Lin S. 2012. Various links between landslide debris and sediment flux during earthquake and rainstorm events. *J Asian Earth Sci*, 54–55: 41–48
- Liu-Zeng J, Wen L, Oskin M, Zeng L. 2011. Focused modern denudation of the Longmen Shan margin, eastern Tibetan Plateau. *Geochem Geophys Geosyst*, 12: Q11007
- Lyons W B, Carey A E, Hicks D M, Nezat C A. 2005. Chemical weathering in high-sediment-yielding watersheds, New Zealand. *J Geophys Res*, 110: F01008
- Ma L, Chabaux F, Pelt E, Blaes E, Jin L, Brantley S L. 2010. Regolith production rates calculated with uranium-series isotopes at Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory. *Earth Planet Sci Lett*, 297: 211–225
- Ma L, Teng F Z, Jin L, Ke S, Yang W, Gu H O, Brantley S L. 2015. Magnesium isotope fractionation during shale weathering in the Shale Hills Critical Zone Observatory: Accumulation of light Mg isotopes in soils by clay mineral transformation. *Chem Geol*, 397: 37–50
- Maher K, Chamberlain C P. 2014. Hydrologic regulation of chemical weathering and the geologic carbon cycle. *Science*, 343: 1502–1504
- Malamud B D, Turcotte D L, Guzzetti F, Reichenbach P. 2004. Landslides, earthquakes, and erosion. *Earth Planet Sci Lett*, 229: 45–59
- Marc O, Behling R, Andermann C, Turowski J M, Illien L, Roessner S, Hovius N. 2019. Long-term erosion of the Nepal Himalayas by bedrock landsliding: The role of monsoons, earthquakes and giant landslides. *Earth Surf Dynam*, 7: 107–128
- Marc O, Hovius N, Meunier P, Uchida T, Hayashi S. 2015. Transient changes of landslide rates after earthquakes. *Geology*, 43: 883–886
- Marc O, Hovius N, Meunier P, Gorum T, Uchida T. 2016. A seismologically consistent expression for the total area and volume of earthquake-triggered landsliding. *J Geophys Res-Earth Surf*, 121: 640–663
- Märki L, Lupker M, Gallen S, Gajurel A, Haghipour N, Schide K, France-Lanord C, Lave J, Morin G, Eglinton T. 2018. Controls of earthquake-triggered landslides on riverine sediment and organic carbon export in the Central Himalaya. EGU General Assembly Conference Abstracts, 20: EGU2018-4337
- Meunier P, Hovius N, Haines A J. 2007. Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion. *Geophys Res Lett*, 34: L20408
- Mohr C H, Manga M, Wang C, Kirchner J W, Bronstert A. 2015. Shaking water out of soil. *Geology*, 43: 207–210
- Molnar P, Anderson R S, Anderson S P. 2007. Tectonics, fracturing of rock, and erosion. *J Geophys Res*, 112: F03014
- Molnar P, England P. 1990. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: Chicken or egg? *Nature*, 346: 29–34
- Montgomery D R, Manga M. 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes. *Science*, 300: 2047–2049
- Murphy B P, Johnson J P L, Gasparini N M, Sklar L S. 2016. Chemical weathering as a mechanism for the climatic control of bedrock river incision. *Nature*, 532: 223–227
- Parker R N, Densmore A L, Rosser N J, de Michele M, Li Y, Huang R, Whadcoat S, Petley D N. 2011. Mass wasting triggered by the 2008

- Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth. *Nat Geosci*, 4: 449–452
- Pearce A J, Watson A J. 1986. Effects of earthquake-induced landslides on sediment budget and transport over a 50-yr period. *Geology*, 14: 52–55
- Pelt E, Chabaux F, Innocent C, Navarre-Sitchler A K, Sak P B, Brantley S L. 2008. Uranium-thorium chronometry of weathering rinds: Rock alteration rate and paleo-isotopic record of weathering fluids. *Earth Planet Sci Lett*, 276: 98–105
- Petley D N, Hearn G J, Hart A, Rosser N J, Dunning S A, Owen K, Mitchell W A. 2007. Trends in landslide occurrence in Nepal. *Nat Hazards*, 43: 23–44
- Peucker-Ehrenbrink B, Ravizza G, Hofmann A W. 1995. The marine $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ record of the past 80 million years. *Earth Planet Sci Lett*, 130: 155–167
- Raymo M E, Ruddiman W F. 1992. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359: 117–122
- Raymo M E, Ruddiman W F, Froelich P N. 1988. Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles. *Geology*, 16: 649–653
- Ren Z, Zhang Z, Yin J. 2017. Erosion associated with seismically-induced landslides in the middle Longmen Shan region, eastern Tibetan Plateau, China. *Remote Sens*, 9: 864
- Restrepo C, Walker L R, Shiels A B, Bussmann R, Claessens L, Fisch S, Lozano P, Negi G, Paolini L, Poveda G, Ramos-Scharrón C, Richter M, Velázquez E. 2009. Landsliding and its multiscale influence on mountainscapes. *Bioscience*, 59: 685–698
- Roback K, Clark M K, West A J, Zekkos D, Li G, Gallen S F, Chamlagain D, Godt J W. 2018. The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015 M_w 7.8 Gorkha earthquake, Nepal. *Geomorphology*, 301: 121–138
- Robinson T R, Davies T R H. 2013. Review Article: Potential geomorphic consequences of a future great ($M_w=8.0+$) Alpine Fault earthquake, South Island, New Zealand. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 13: 2279–2299
- Rojstaczer S, Wolf S, Michel R. 1995. Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquake-induced hydrological changes. *Nature*, 373: 237–239
- Romans B W, Castellort S, Covault J A, Fildani A, Walsh J P. 2016. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales. *Earth-Sci Rev*, 153: 7–29
- Ruddiman W F. 1997. Tectonic Uplift and Climate Change. New York: Plenum Press. 239–365, 399–515
- Sato H P, Hasegawa H, Fujiwara S, Tobita M, Koarai M, Une H, Iwahashi J. 2007. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT 5 imagery. *Landslides*, 4: 113–122
- Schwanghart W, Bernhardt A, Stolle A, Hoelzmann P, Adhikari B R, Andermann C, Tofelde S, Merchel S, Rugel G, Fort M, Korup O. 2016. Repeated catastrophic valley infill following medieval earthquakes in the Nepal Himalaya. *Science*, 351: 147–150
- Shin T C, Teng T L. 2001. An overview of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Bull Seismol Soc Am*, 91: 895–913
- Skelton A, Andrén M, Kristmannsdóttir H, Stockmann G, Mörtz C M, Sveinbjörnsdóttir Á, Jónsson S, Sturkell E, Guðrúnardóttir H R, Hjartarson H, Siegmund H, Kockum I. 2014. Changes in ground-water chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland. *Nat Geosci*, 7: 752–756
- Shi Z, Wang G, Manga M, Wang C Y. 2015. Continental-scale water-level response to a large earthquake. *Geofluids*, 15: 310–320
- Steer P, Simoes M, Cattin R, Shyu J B H. 2014. Erosion influences the seismicity of active thrust faults. *Nat Commun*, 5: 5564
- Stevens C, McCaffrey R, Silver E A, Sombo Z, English P, van der Kevie J. 1998. Mid-crustal detachment and ramp faulting in the Markham Valley, Papua New Guinea. *Geology*, 26: 847–850
- Suzuki W, Aoi S, Sekiguchi H. 2010. Rupture process of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake derived from near-source strong-motion records. *Bull Seismol Soc Am*, 100: 256–266
- Teng F Z, Li W Y, Rudnick R L, Gardner L R. 2010. Contrasting lithium and magnesium isotope fractionation during continental weathering. *Earth Planet Sci Lett*, 300: 63–71
- Teng F Z, Wang S, Moynier F. 2019. Tracing the formation and differentiation of the Earth by non-traditional stable isotopes. *Sci China Earth Sci*, 62: 1702–1715
- Torres M A, West A J, Li G. 2014. Sulphide oxidation and carbonate dissolution as a source of CO_2 over geological timescales. *Nature*, 507: 346–349
- Vanmaercke M, Ardizzone F, Rossi M, Guzzetti F. 2017. Exploring the effects of seismicity on landslides and catchment sediment yield: An Italian case study. *Geomorphology*, 278: 171–183
- Vigier N, Burton K W, Gislason S R, Rogers N W, Duchene S, Thomas L, Hodge E, Schaefer B. 2006. The relationship between riverine U-series disequilibria and erosion rates in a basaltic terrain. *Earth Planet Sci Lett*, 249: 258–273
- Wang J, Jin Z, Hilton R G, Zhang F, Densmore A L, Li G, West A J. 2015. Controls on fluvial evacuation of sediment from earthquake-triggered landslides. *Geology*, 43: 115–118
- Wang J, Jin Z, Hilton R G, Zhang F, Li G, Densmore A L, Gröcke D R, Xu X, West A J. 2016. Earthquake-triggered increase in biospheric carbon export from a mountain belt. *Geology*, 44: 471–474
- Wang J, Hilton R G, Jin Z, Zhang F, Densmore A L, Gröcke D R, Xu X, Li G, West A J. 2019. The isotopic composition and fluxes of

- particulate organic carbon exported from the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Geochim Cosmochim Acta*, 252: 1–15
- Wang J, Howarth J D, McClymont E L, Densmore A L, Fitzsimons S J, Croissant T, Gröcke D R, West M D, Harvey E L, Frith N V, Garnett M H, Hilton R G. 2020. Long-term patterns of hillslope erosion by earthquake-induced landslides shape mountain landscapes. *Sci Adv*, 6: eaaz6446
- Wang W, Godard V, Liu-Zeng J, Scherler D, Xu C, Zhang J, Xie K, Bellier O, Ansberque C, de Sigoyer J, ASTER Team. 2017. Perturbation of fluvial sediment fluxes following the 2008 Wenchuan earthquake. *Earth Surf Process Landforms*, 42: 2611–2622
- West A J. 2012. Thickness of the chemical weathering zone and implications for erosional and climatic drivers of weathering and for carbon-cycle feedbacks. *Geology*, 40: 811–814
- West A J, Galy A, Bickle M. 2005. Tectonic and climatic controls on silicate weathering. *Earth Planet Sci Lett*, 235: 211–228
- West A J, Hetzel R, Li G, Jin Z, Zhang F, Hilton R G, Densmore A L. 2014. Dilution of ^{10}Be in detrital quartz by earthquake-induced landslides: Implications for determining denudation rates and potential to provide insights into landslide sediment dynamics. *Earth Planet Sci Lett*, 396: 143–153
- Whipple K X, Forte A M, DiBiase R A, Gasparini N M, Ouimet W B. 2017. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: Implications for the role of divide mobility in landscape evolution. *J Geophys Res-Earth Surf*, 122: 248–273
- White A F, Blum A E. 1995. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochim Cosmochim Acta*, 59: 1729–1747
- Willenbring J K, von Blanckenburg F. 2010. Long-term stability of global erosion rates and weathering during late-Cenozoic cooling. *Nature*, 465: 211–214
- Willett S D. 1999. Orogeny and orography: The effects of erosion on the structure of mountain belts. *J Geophys Res*, 104: 28957–28981
- Willett S D, McCoy S W, Perron J T, Goren L, Chen C Y. 2014. Dynamic reorganization of river basins. *Science*, 343: 1248765
- Willett S D, Slingerland R, Hovius N. 2001. Uplift, shortening, and steady state topography in active mountain belts. *Am J Sci*, 301: 455–485
- Wimpenny J, Colla C A, Yin Q Z, Rustad J R, Casey W H. 2014. Investigating the behaviour of Mg isotopes during the formation of clay minerals. *Geochim Cosmochim Acta*, 128: 178–194
- Wu C C, Kuo Y H. 1999. Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. *Bull Am Meteorol Soc*, 80: 67–80
- Xue L, Li H B, Brodsky E E, Xu Z Q, Kano Y, Wang H, Mori J J, Si J L, Pei J L, Zhang W, Yang G, Sun Z M, Huang Y. 2013. Continuous permeability measurements record healing inside the Wenchuan earthquake fault zone. *Science*, 340: 1555–1559
- Yanites B J, Tucker G E, Mueller K J, Chen Y G. 2010. How rivers react to large earthquakes: Evidence from central Taiwan. *Geology*, 38: 639–642
- Zhang F, Jin Z, West A J, An Z, Hilton R G, Wang J, Li G, Densmore A L, Yu J, Qiang X, Sun Y, Li L, Gou L, Xu Y, Xu X, Liu X, Pan Y, You C F. 2019. Monsoonal control on a delayed response of sedimentation to the 2008 Wenchuan earthquake. *Sci Adv*, 5: eaav7110

(责任编辑: 李小强)