



新闻动态

您现在的位置: 首页 > 新闻动态 > 学术前沿

- 图片新闻
- 头条新闻
- 通知公告
- 学术活动
- 综合新闻
- 科研动态
- 研究亮点
- 学术前沿

Nature: 汇聚板块边缘逆冲剪切力控制着山脉高度

2020-08-24 | 【大 中 小】 【打印】 【关闭】

山脉作为地球上主要的地貌之一，构成了世界地形的“骨架”。它们通常受到构造挤压作用而形成，因此重要山脉大多发育在板块汇聚带。但是，控制山脉高度的因素很多且存在争议，几十年来一直困扰着地球科学家。加拿大地质调查局王克林研究员总结了三个主要作用（图1）：（1）构造作用力，既可以防止山脉在重力作用下垮塌，也会阻碍它们被推得无限高；（2）气候控制的侵蚀作用，主要通过移除高海拔地区的物质来限制山脉的高度；（3）地壳均衡作用，它使山脉及其之下的岩石圈浮在软流圈之上，并对山脉质量的增减产生反馈（Wang, 2020）。虽然这三种过程共同维持着山脉的高度，但到底是侵蚀力还是构造力起着一级控制作用，并未达成共识。

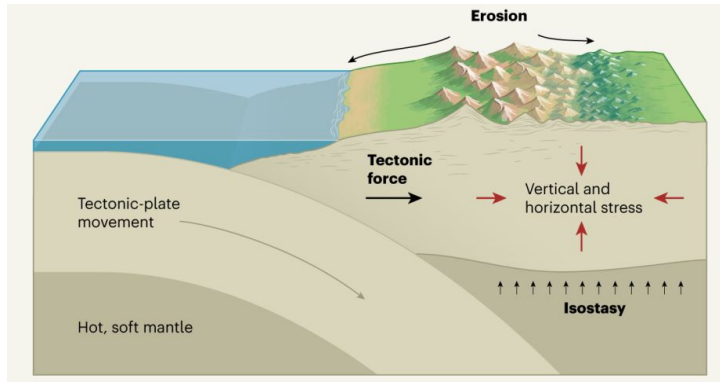


图1 控制汇聚构造板块边界附近山体高度的三种过程 (Wang, 2020)

随着研究的深入，越来越多的学者认为主要是气候作用控制着山脉的高度。Brozovic et al. (1997) 将喜马拉雅山脉西构造结位置划分为多个区域，通过对比研究发现整体地貌的形成很大程度上取决于构造力，但在雪线附近区域，冰川作用抑制了高程的增加和地形起伏，与构造作用的速率无关。气候不仅影响山脉隆升，引起气候新一轮变化，还可以影响并控制构造的演化（Molnar and England, 1990）。例如，喜马拉雅山脉的物理及数值模拟实验表明，气候造成的快速剥蚀作用可致地下壳热而软的物质沿通道向南流动并出露地表（图2）。

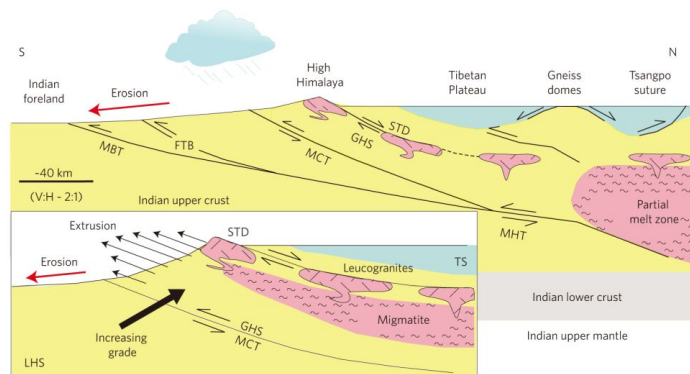


图2 喜马拉雅地区受侵蚀作用驱动变形过程 (Beaumont et al., 2001; Whipple, 2009)

近期德国波茨坦地学研究中心的Armin Dielforder等人在Nature上发表论文 (Dielforder et al., 2020)，对分布在不同纬度范围 (~53° N- ~40° S)、覆盖明显不同气候条件的10个汇聚板块边缘的山脉高度与相关的构造应力进行了分析对比，提出构造剪切应力大小控制山脉的高度，从而重新强调了构造在控制汇聚板块边界处山脉高程上的主导作用。

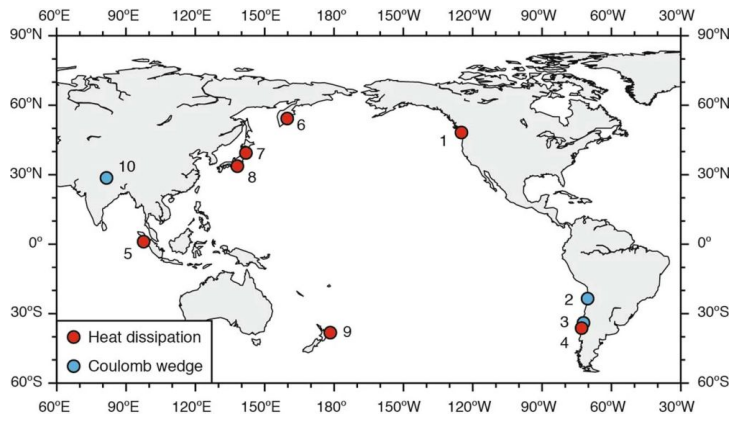


图3 研究的10个山脉位置 (Dielforder et al., 2020)。图中序号: 1. 卡斯卡迪亚 (Cascadia) 北部。2. 安第斯山 (23° S)。3. 安第斯山 (34° S)。4. 安第斯山 (36° S)。5. 苏门答腊北部。6. 堪察加半岛。7. 日本岛弧。8. 日本南海海槽。9. 希古朗伊山 (Hikurangi) 北段。10. 喜马拉雅山

首先，他们将俯冲带简化为分段流变模型，计算了沿大型逆冲断层的剪切应力(F_s)。该模型将大型逆冲断层分为上摩擦段和下粘性段，它们在半摩擦行为区合并，通过对沿各断层段的剪切力积分计算获得最终的剪应力 F_s (Gao and Wang, 2014)，其大小主要取决于断层强度和摩擦-粘滞过渡的深度 (图4)。

其次，他们使用力学平衡模型，由流变模型推导的 F_s 值计算出了构造力可以支撑山体高度 (TSE)，并与山脉的最大平均高程 (MME) 做对比。在所有研究区内，两个高程值在误差范围内是近似相等的。MME和TSE之间的一致性表明，所有这些山脉的高度大致符合力学平衡 (图5)。

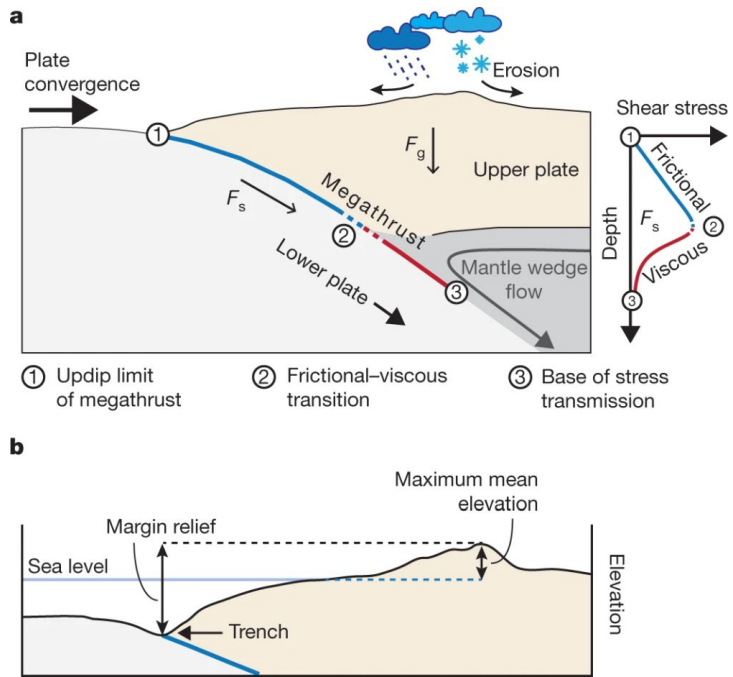


图4 汇聚板块边缘的运动过程和地形简图 (Dielforder et al., 2020)。a. 当一个板块被压在另一个板块之下时，板块汇聚就得以实现。大型逆冲断层构成板块界面，并被划分为摩擦、半摩擦和粘性段。剪切力 F_s 是沿大型逆冲断层的整体剪应力，并平衡板缘地形 (margin relief) 的重力 F_g 产生的差异应力。b. 对于俯冲带而言，板缘地形是海沟与最大平均高程 (MME) 之间的高程差，其中 MME 是主要地形分水岭周围的平均高程。对于没有海沟的碰撞区域，板缘地形近似等于 MME

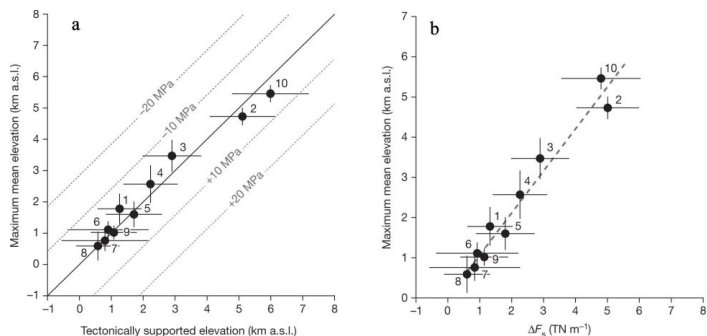


图5 a. 最大平均高程与构造支撑高程对比; b. 最大平均海拔与剪切力分量的比较。碰撞造山带中, 无海平面以下地形, 则 $\Delta F_s = F_s$ (Dielforder et al., 2020)

对于大多数洋-陆俯冲带, TSE落在大约0.6-1.7 km的范围内。在典型的俯冲带, 由于岩石圈的弯曲和上下板块的密度差异, 就需要巨大的逆冲剪切力来支撑板缘地形。沿大型逆冲断层的剪切应力 F_s 可以细分为两个分量, 第一个分量 F_{SMT} 用于支持板缘地形在海平面下的部分, 而另一个分量 ΔF_s 则用于维持海平面之上的山脉高度。所以, 对于喜马拉雅这种碰撞造山带, 因为这里没有需要维持的海底地形, 同样的沿大型逆冲断层的剪切力便会形成更高的山脉。

作为侵蚀作用控制山脉高度的最具代表性的模型, “冰川锯”模型中无论地壳构造作用如何, 冰川侵蚀和均衡抬升均会使山脉的高度保持在受气候控制的雪线高度 (Egholm et al., 2009)。但是, Dielforder et al. (2020) 的研究涵盖了卡斯卡迪亚 (Cascadia)、堪察加半岛和喜马拉雅等不同冰川山脉, 它们的MME与TSE相对应, 证明高程上的巨大差异主要来自 ΔF_s 差异, 进而不支持冰蚀作用对山体高度的一阶控制观点。

Dielforder et al. (2020) 的量化研究为山脉高度的构造控制论注入了一针强心剂, 但由于研究区域有限, 需要更多的证据支持; 同时也得出了一些重要推论, 例如, 在山脉之下水平挤压和垂向重力是均衡的。只有这样, 构造应力才能控制山体的高度。然而, 由于气候可以产生快速剥蚀, 而构造应力积累时间较长, 为补偿剥蚀带来的山体质量缺失, 他们的模型中需要俯冲带上盘的地壳处于破裂的临界状态, 才能通过断裂作用不断叠置地壳岩石, 来抬升山脉的高度, 进而维持水平挤压和垂向重力的均衡状态。但这显然与传统的上地壳脆性强度认识是不同的, 即岩石破裂由差异应力导致, 且水平应力要远高于垂向应力。虽然地壳应力在某些俯冲带附近确实几乎是“中性”的 (Wang et al., 2019), 但这样的地壳应力状态是否普遍存在? Dielforder等人的工作为后续研究提供了一个新的思路, 为了进一步证实“力学临界地壳”这个设想, 还需要大量的观测和理论研究去揭示更多汇聚板块边界的地壳应力状态和强度。

【致谢: 感谢岩石圈室陈凌研究员、梁晓峰副研究员的意见和建议。】

主要参考文献

Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, et al. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation[J]. *Nature*, 2001, 414(6865): 738-742. (链接)

Brozovic N, Burbank D W, Meigs A J. Climatic limits on landscape development in the northwestern Himalaya[J]. *Science*, 1997, 276(5312): 571-574. (链接)

Dielforder A, Hetzel R, Oncken O. Megathrust shear force controls mountain height at convergent plate margins[J]. *Nature*, 2020, 582(7811): 225-229. (链接)

Egholm D L, Nielsen S B, Pedersen V K, et al. Glacial effects limiting mountain height[J]. *Nature*, 2009, 460(7257): 884-887. (链接)

Gao X, Wang K. Strength of stick-slip and creeping subduction megathrusts from heat flow observations[J]. *Science*, 2014, 345(6200): 1038-1041. (链接)

Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg?[J]. *Nature*, 1990, 346(6279): 29-34. (链接)

Wang K, Brown L, Hu Y, et al. Stable forearc stressed by a weak megathrust: Mechanical and geodynamic implications of stress changes caused by the M= 9 Tohoku-Oki earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(6): 6179-6194. (链接)

Wang K L. Force takes control in mountain-height debate[J]. *Nature*, 2020, 582: 189-190. (链接)

Whipple K X. The influence of climate on the tectonic evolution of mountain belts[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(2): 97-104. (链接)

(撰稿: 辛光耀, 褚杨/岩石圈室)