构造地貌学: 构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究

刘静^{1*}, 张金玉¹, 葛玉魁¹, 王伟¹, 曾令森², 李根³, 林旭⁴

1. 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3. Department of Earth, Planetary and Space Sciences, University of California, Los Angeles CA 90095, USA;

4. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358

* 联系人, E-mail: liu-zeng@ies.ac.cn

2018-05-19 收稿, 2018-08-19 修回, 2018-08-20 接受, 2018-09-26 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFC0600310)、国家自然科学基金(41761144065, 41502188)和中国地震局地质研究所地震动力学重点实验室项目(LED2016A02)资助

摘要 构造地貌学是发展迅速的新兴交叉学科. 与传统地貌学不同, 构造地貌学是一种定量地貌学, 强调对地貌过程的定量描述, 其核心概念是构造-气候-地表过程相互作用, 聚焦于以量化的方式具体阐述构造活跃造山带地区气候、地形、水文、物理和化学剥蚀、沉积以及岩石变形之间的相互作用. 本文首先阐释构造地貌学的主要科学问题与核心概念, 即构造、气候和地表过程之间的相互作用. 随后简要介绍构造地貌学的主要研究方法和手段, 特别是对学科发展起到重要推动作用的测年手段(如宇宙成因核素和低温热年代学)和空间探测技术手段(如LiDAR). 基于近年来构造地貌学的研究实例, 梳理了构造-气候-地表过程相互作用的研究中获得的一些重要认知, 这些研究实例涵盖的时空尺度巨大: 时间跨度从数小时到百万年, 空间跨度从单个断裂到整个造山带. 这些跨度广泛的研究对理解造山带的地形演化具有重大的启示意义. 最后, 简要总结了构造地貌学的前沿问题.

关键词 构造地貌学, 构造-气候-地表过程, 地貌演化, 地质测年技术, 空间探测技术

构造地貌学主要研究构造与气候之间的相互作用以及侵蚀和沉积等地表过程对活动构造区的地形、地貌塑造的过程, 为更好地理解地球不同圈层之间(包括岩石圈、大气圈与生物圈)的相互作用提供数据支持^[1-10]. 自20世纪90年代以来, 随着新测年技术和空间探测方法(包括全球卫星定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)和激光雷达测距(LiDAR)等)的迅猛发展和应用, 以定量构造地貌学的兴起为标志, 构造地貌学成为地球科学领域新的热点研究方向之一. 因而国际上对构造-气候-地表过程之间耦合关系的研究力度和关注程度越来越大, 涉及学科和方法也日益广泛(包括地貌学、构造地质学、沉积学、水文学、环境学、低温/中-低温地质年代学和大陆动力学数值

模拟等). 构造地貌学研究的核心是量化和详细阐述构造活跃的造山带地区气候、地形、水文、物理和化学剥蚀、沉积和岩石变形之间的相互作用, 强调地球表层的各种动态过程之间的相互作用, 使其在灾害防御、环境保护、气候变迁、生物地球化学循环和新构造演化等领域展现出广阔的应用前景.

地球表层是岩石圈、大气圈和生物圈等各圈层发生关联和相互作用的接合部位, 是高度动态变化的界面. 在此界面上, 物理、化学和生物等多种过程以及人类活动均可作为地球系统的作用力而产生效应并互相反馈影响. 地球表面的地貌形态是地球深部各活跃过程与大气圈动态相互作用的产物. 这些相互作用的时间尺度跨越几个数量级, 从百万年、数

引用格式: 刘静, 张金玉, 葛玉魁, 等. 构造地貌学: 构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究. 科学通报, 2018, 63: 3070-3088

Liu J, Zhang J Y, Ge Y K, et al. Tectonic geomorphology: An interdisciplinary study of the interaction among tectonic climatic and surface processes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 3070-3088, doi: 10.1360/N972018-00498

周、几小时直至地震触发滑坡的几秒钟。越来越多的研究试图在造山带地表侵蚀和盆地沉积等地质记录里寻找相互作用的证据并诠释其机理,所以最近二三十年,越来越多的构造地貌研究冲击着传统构造地质学、地貌学、表生地球化学和矿物学中的一些认识,主要包括:(1) 构造、气候和侵蚀过程三者构成一个动态耦合的相互作用体系(图1),气候变化不仅是构造抬升/造山被动响应的产物,而且是直接参与其中相互影响;(2) 构造变形不完全等同于地貌地形的生长,比如在某些条件下,构造运动持续作用但山脉高度不变;(3) 浅表生物作用强烈影响岩石的化学风化和物理侵蚀速率,因此在大陆地貌形成和演化过程中的作用不可忽视;(4) 地表侵蚀可以解释金属矿床的某些分布特征,长期的差异剥蚀作用不仅可以使深部的矿床剥露于地表,也会不同程度地破坏位于浅表或地壳深部的矿床;(5) 快速剥蚀作用影响和调节深部地质过程,导致深部变质作用和浅表剥蚀作用的耦合。因此,现代构造地貌学是连接气候学、地貌学、构造地质学和地球物理学之间的交叉学科,为不断深入研究构造、气候和地表之间的相互作用创造新机遇。基于此,本文在近几年构造地貌学研究基础上,罗列出目前构造地貌学主要的研究方法和手段,详细阐述构造、气候和地表过程相互作用的内涵和时间尺度,展望构造地貌学研究中的前沿问题,为该领域今后的研究提供方向和借鉴。

1 主要研究方法和手段

构造地貌学的特点之一,也是其学科立足发展

的基础是量化研究,体现在定量获取地貌特征参数、地貌演化过程的变化速率等数据,以及利用物理和数学方程描述地表三维形态特征和演化,量化构造抬升和地表侵蚀在塑造山脉或高原地形中的竞争和耦合关系。

构造地貌学快速发展的契机是20世纪90年代以来高精度数字高程模型(digital elevation models, DEM)的出现。它是地形的数字表达,易于三维可视化和统计分析,使人能更加直观地观察地形,快速、高效地分析不同尺度地貌形态的宏观参数。随着数据精度的不断提高,DEM在构造地貌研究中的应用越来越广泛深入,已成为构造地貌研究,特别是河流地貌定量研究不可缺少的基础数据。其应用从最初提供简单的地形图示,到提取宏观地貌参数,进而到提取河流地貌定量指标,来定量研究地貌演化中地表侵蚀形成过程,促进构造地貌研究由定性进入半定量-量化阶段。

构造地貌学实现量化研究的技术和方法主要包括:室内和野外构造地貌填图;河流平面和纵剖面特征提取和分析;高精度地形数据采集和三维可视化;实验构造地貌方法如沙盘和水槽等;地形演化数值模拟方法等;以及地貌单元年龄的高精度质谱测年法等(图2)。其中对学科发展起到关键促进作用的测试及观测技术主要有以下3种:(1) 低温热年代学法,提供地质体的隆升时间和地表侵蚀速率;(2) 宇宙成因核素方法,直接测定地貌面的绝对年龄;(3) 全球范围内高精度数字地形数据(如LiDAR)的积累和共享程度不断的增加。这些新进展为我们理解各

图1 (网络版彩色)构造、气候和侵蚀之间发生相互作用的关联过程简述(改自文献[2])

Figure 1 (Color online) Cartoons showing the interactions between tectonics, climate and erosion(modified from Ref. [2])

图2 (网络版彩色)构造地貌学中的4个基本研究方法和技术(改自文献[11~13])

Figure 2 (Color online) Four basic research methods and techniques used in tectonic geomorphology (modified from Refs. [11–13])

个时空尺度上地貌演化的动态过程以及气候、地表和构造作用之间的联系提供有利条件。

1.1 新的空间探测技术和高精度数字地形刻画

新空间探测技术和计算方法的发展,极大增强了我们探查地球表面地貌动态和静态特征的能力。所获取的地球表面特征变量达到前所未有的高时空分辨率和细微度,而且还在持续拓展。高精度空间成像技术(如激光雷达和摄影成像技术等),提供了革命性的技术创新,使地学工作者可以精细刻画静态地貌景观和动态形成过程。因其可以获得大范围的极高空间精度数据,从野外露头到行星尺度的空间跨度内寻找构造、气候与地表过程之间关联和相互作用的证据,能更有效地检验各种描述地表过程的物理模型的适用性。

激光雷达测距(light detection and ranging, LiDAR)技术,早期称为机载激光扫描带绘技术(ALSM),能够快速测定大范围的高分辨率三维地形,有效去除地表植被或人工地物的影响,逐渐成为断裂带地表位错测量以及构造地貌量化研究的可靠技术^[14,15]。激光雷达探测中,仪器发射激光脉冲然后接收从反射界面返回的信号,通过延迟时间计算出距离。目前机载激光雷达扫描数据在水平和垂直方向上可达到厘

米级精度,而地基激光雷达扫描精度则更高,可达毫米级。在点云数据基础上可以利用各种分析手段来区分地表植被和真实地面,之后可以创建裸地面的数字高程模型(DEM)。在人迹罕至或植被覆盖密等传统方法无法解决的数据匮乏区,机载LiDAR技术具有突出的强大优势。具有真实地球坐标的高分辨率和高精度数据催生一系列新的研究领域,如借助LiDAR数据,对研究对象实施一定时间间隔的多次扫描,刻画其随着时间发生的细微变化,再现真实世界的动态变化特征,深化理解地表过程的类型和速率^[16]。2010年墨西哥El Mayor-Cucapah地震之后,Oskin等人^[17]利用发震断层的震后与震前机载LiDAR地形数据差分研究,首次获得近断层弥散式同震变形的分布图像,得到了以往常规技术方法所无法揭示的微观位移场的丰富信息。刘静等人^[16]对海原断裂带开展机载三维激光雷达扫描,实现对海原断裂带微地貌形态和断层几何的高清晰度三维再现和细致刻画。此外随着海量的高清地形和影像数据快速增长,借助具有3D显示功能或立体投影的虚拟现实地质地貌填图将进一步突破传统地学研究方法。近年来,SfM(structure from motion)多视角移动摄影测量技术以其方便快捷、低成本获取数公里至数十公里尺度工作区的高分辨率三维地形数据而广受关注^[18]。

它是通过运动的相机获取多视角立体图像集来确定相机的空间位置和姿态,进而重建三维地形的一种测量方法。与LiDAR相比,利用SfM技术的无人机与相机组合在数据采集中更高效、成本更低、应用更广泛,但不适合植被覆盖较密地区。详细的地形数据对河流定量研究非常重要,然而因为大多数洪积平原的高度差异有限,传统方法获得的地形数据、例如地形图,通常不足以准确识别并填出所有相关地貌。LiDAR数据具有大空间范围、高分辨率和高垂向准确度高的特点,因此其获取和应用已成为河流地貌学家的关注热点并应用于河流地貌研究中。在河流地貌研究中,时序LiDAR数据可以模拟时间变化和定量河流过程的速率,例如河岸侵蚀^[19]。此外地基LiDAR数据也用来开展水动力模拟^[20,21],或者关注河漫滩有关侧向河流动力学的形态方面^[22-24]。

因而,总体来看以陆基和机载激光雷达(LiDAR)为代表的高精度地形数据,结合GIS技术和各种地貌分析手段,可以对不同空间尺度的地形、地貌特征开展高分辨率的定量描述,实现构造地貌和地表过程的可视化和地貌指标的定量分析^[15,16],这包括:(1)人类活动(包括修路、开矿、农业和林业等)和自然过程(湖岸和海岸变化等)引起自然地貌的改变;(2)滑坡、河流和冰川侵蚀、物质运移和沉积等地质过程,引起河流和山地地貌的几何特征变化;(3)地壳运动如单次地震和断裂长期活动的形貌印记,包括断裂带几何展布、断裂运动性质和运动量等。

1.2 新测年技术的快速发展

自20世纪早期,地质学家就已认识到需要深入了解地貌演化、侵蚀和沉积过程的控制机理,然而受限于当时的科技条件,这一问题迟迟没有获得突破性发展,近几十年随着科技水平的不断提高,新的测年方法拓展了构造地貌学研究的广度和深度,极大促进其定量化研究的程度。

地球表面物质直接接受如质子、中子等来自宇宙高能射线的轰击,当宇宙射线击中目标原子(^{16}O , ^{14}N , ^{40}Ca , ^{28}Si)的原子核后在地球大气圈及地表形成的新核素被称为宇宙成因核素^[25,26]。不少岩石矿物中普遍含有宇宙成因核素,其中包括量化千年到百万年尺度的放射性宇宙成因核素(^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al 和 ^{36}Cl)以及具有更长时间尺度的稳定宇宙成因核素(^3He , ^{21}Ne),这可以满足不同年龄地质样品的测量。

因为原地宇宙成因核素含量随着岩体暴露时间的积累而逐渐增加^[25,26],所以可将其作为一种绝对定年方法使用,可以在各种时间和空间尺度上细致刻画地表过程的年龄和速率。目前 ^{10}Be 和 ^{26}Al 是宇宙成因核素年代学中应用最为广泛的两种核素。

宇宙成因核素在地表过程研究中的应用可归为两类。一类是测定地质体的暴露和埋藏年龄。宇宙成因核素暴露定年是通过测定河流阶地、冲-洪积扇、湖岸堆积、冰缘冰碛物沉积以及基岩断层崖等地貌面上的核素浓度来获得其暴露年龄以此来研究其形成和演化历史。结合相应地貌面的位错大小,测定地貌面的暴露年龄还可用于获得不同时间尺度的断层活动速率。而两种不同宇宙成因核素组成的核素对(例如 ^{10}Be 和 ^{26}Al)可以用来确定沉积物的埋藏历史,例如洞穴沉积物的埋藏时间和沉积序列中某一层位的沉积时间等。宇宙成因核素另一方面的应用是量化地貌景观的侵蚀速率,如基岩面,风化壳和汇水盆地等。侵蚀速率的量化是研究构造和气候之间相互作用以及地表地貌响应过程的基础^[27,28]。通过测量现今或古河流沉积物的宇宙成因核素浓度可以量化流域内的平均侵蚀速率,而基岩样品的核素浓度可以用来量化单点的坡面侵蚀速率^[11,29]。最近,土壤中的宇宙成因核素也常常被用来量化冰缘过程导致的土壤混合速率,以及基岩风化生成土壤的速率等^[30,31]。目前利用宇宙射线生成的核素系统(CRONUS),对核素生成速率修正更精确,降低了暴露年龄和侵蚀速率计算的不确定性(<http://hess.ess.washington.edu/>)。此外,宇宙成因稀有气体技术和应用上的不断发展,使得宇宙成因核素技术能在更多矿物中加以应用^[32,33]。

地质年代学和热年代学是在同位素年代学基础上结合矿物封闭温度理论发展起来的,主要利用母体核素的放射性衰变和相应子体产物的积累,确定矿物的结晶年龄或冷却年龄的一种技术方法。Dodson^[34]于1973年首次提出封闭温度的概念,即矿物形成封闭衰变体系的温度,其不但与矿物有关,与冷却速率也密切相关,极大地推动了热年代学的发展。事实上,封闭温度不是一个特定的温度值,而是一个温度区间,当温度低于这个区间,衰变子体将被保留在封闭体系内。这个区间在裂变径迹(FT)体系内被称为部分退火带(the partial annealing zone, PAZ),而在(U-Th)/He体系内被称为部分保留带(the partial reten-

tion zone, PRZ)^[35]. FT测年通过统计矿物中由放射性同位素所造成的损伤即径迹的条数来统计矿物冷却年龄,其对应的封闭温度较低,锆石和磷灰石FT封闭温度分别为180~350℃和60~120℃^[36~39], FT年龄结合相关的径迹长度进行数值模拟,可以反演地壳上部3~8 km的热演化史^[35,38]. (U-Th)/He测年体系基于²³⁸U, ²³⁵U和²³²Th衰变产生⁴He, 相比于其他热年代学方法,其具有较低的封闭温度(磷灰石: 50~90℃; 锆石: 170~190℃), 能够记录上部地壳1~6 km的热演化信息^[36,40,41].

低温热年代学自20世纪80年代以来在地质应用研究中获得了很大的成功. 目前主要利用FT和(U-Th)/He测年技术研究岩石在地壳浅部的冷却过程,其不仅能够反映岩石矿物达到封闭温度时的时间,还能根据相应扩散和退火模型记录岩石的冷却历史、剥露过程和冷却速率,重建造山带剥露与盆地沉降沉积之间的耦合关系,确定断裂活动时限以及古地形演变过程等^[36,42~45]. 低温热年代学研究中常用的样品采集方法包括基岩高程剖面法和河砂碎屑矿物法,数据分析中用到单样品多技术法以及正演和反演模拟法等^[36,46]. 基岩剖面法和河砂碎屑法有较好的互补性,基岩剖面法可以获得单点隆升剥蚀热历史的细节,而碎屑矿物热年代学是以沉积物中未遭受热重置的碎屑矿物颗粒为研究对象,在物源分析、源区构造热历史、古地形恢复和约束方面应用广泛. 在无法达到的高山地区难以获取基岩样品,碎屑低温热年代学可以定量重建一个流域-山脉尺度的演化和剥蚀热历史. 比如在阿拉斯加东南部的St Elias构造结,利用冰川携带到下游的碎屑物质,使用多种封闭温度的地质或热年代计,可以继续重建因冰川覆盖而不能获取样品的地区详细的年代学历史^[47,48]. 因此,碎屑矿物热年代学近年来得到越来越多的应用^[47~51].

2 构造、气候和地表过程的相互作用

2.1 构造、气候和地表过程相互作用的内涵

山脉或高原地貌的形成是岩石圈构造运动和大气圈以及地表过程联合作用的结果^[3,52,53]. 构造、侵蚀与气候之间存在广泛的相互作用关系(图1, 3): 板块俯冲、火山作用及剥蚀和化学风化调节温室气体(CO₂等)的循环,影响长期气候变化. 构造作用在一定范围内对气候造成强烈的影响,造山带隆起将成

为大气循环的障碍,尤其是当造山带垂直于大气循环路线时,将阻碍或改变大气环流进而影响全球气候. 地壳变形能够抬高地形,增加地表起伏,进而增加河流和冰川的潜在动力,加快区域剥蚀;反过来,侵蚀可以改造造山带,强烈的侵蚀会导致岩石由于地壳均衡反弹作用而进一步抬升,长期侵蚀作用可以降低造山带的高度和面积(图1). 气候也影响侵蚀作用,例如降水增加和冰川扩大可以使得一个地区侵蚀速率增强. 侵蚀过程反过来也会影响到气候,侵蚀暴露出岩石新鲜面的化学风化作用可以影响流域中水的化学组成,陆地生物圈的剥蚀会导致有机碳的埋藏或者氧化,这些过程都可以调控大气中二氧化碳的含量,从而在地质时间尺度上影响气候系统演化^[12,54~61].

构造运动的形式和速率受地球内部的应力状态控制. 在构造活动活跃地区,气候或地表过程往往通过沉积加载和侵蚀卸载影响地球内部的应力状态,通过重力均衡来调整深部物质垂向和侧向的运移速率,该过程造成的地形变化反过来可以进一步影响浅表过程(图3). 构造、气候和地表侵蚀过程三者构成了动态耦合的相互作用体系,在这样高度耦合的体系中,重力均衡实际上是浅表作用与深部作用之间的信号倍增器^[3,62]. 气候和剥蚀过程不仅响应于构造抬升,也直接参与其中,驱动构造变形. 如图3所示,挤压汇聚板块边界带上,降水量大的位置往往地表侵蚀能力强,导致持续累积的深部应变集中而形成构造薄弱带. 来自不同方向的水汽在遇到造山带地形高差时,降水呈现不同的空间分布特征,直接影响着地球深部的变形模式,造山带的地形和应变配分宽窄不同的变形样式.

2.2 构造-气候-地表过程相互作用的时空跨度

地球浅表过程与深部过程在多方面是耦合的. 构造-侵蚀-气候相互作用可以发生在很宽泛的时间尺度内,从单次暴雨事件、到地震过程、甚至到数百万年尺度,相关研究的核心是阐述和理解不同时间尺度上气候或气候变化在地壳乃至地幔尺度深部构造过程的影响,以及更长时间尺度上在地貌演化中的累计效应. 下面将从不同时间尺度分别举例说明气候和构造之间的相互作用和影响.

2.2.1 短时间尺度(小时~年)

已有研究表明即使单次气候事件也会影响到地

图3 (网络版彩色)涵盖气候、侵蚀和构造作用的数值模拟显示相同构造边界条件但不同气候边界条件(水汽来源的方向)气候差异造成侵蚀作用空间分布格局可以影响造山带的变形样式,控制岩石的抬升和侧向运动(改自文献[53])

Figure 3 (Color online) Numerical modeling with coupled climate, erosion and tectonic processes shows that different climatic conditions, even under the same tectonic boundary condition, would result in different erosion pattern, which affects the rock uplift and lateral motion and thus deformation style at the orogenic scale (modified from Ref. [53])

壳深部的应力变化,从而引起断裂上的动态活动。例如, Liu等人^[63]报道了飓风可能引发活动断裂上的慢地震现象。他们发现,2004年12月一次飓风期间,台湾东海岸纵谷断裂不同位置的3个井下应变仪记录到的随时间变化的膨胀率与飓风的持续时间有很好的相关性。他们用位错理论的数值模拟反演深部断裂慢速滑移的扩展速度和变形范围,很好地解释了井下应变仪的记录。纵谷断裂是一条蠕滑和黏滑段相间的冲断型活动断裂,断面倾向陆地一侧。当台风来临时,陆地上空气压降低,从而降低断层上盘的上覆压力,而断层下盘的海域区,由于低气压与高水面海水相平衡而所对应的下盘地壳同一深度的压力基本保持不变。对于一条位于海边并朝陆地倾斜的逆断层而言,断层上盘的压力降低而下盘保持不变的话,其应力差使逆断裂上的正应力减小,引起断层的逆

冲活动而发生“慢地震”。

喜马拉雅主碰撞带的地壳运动观测研究发现, GPS速度场尤其是垂向分量存在季节性的上下波动和相位移动,主要与断裂南部恒河平原地表水荷载的季节变化有关^[64](图4)。同时,喜马拉雅主断裂带地震活动性研究发现,在冬季时小震活动频度要远远高于夏季,也可以由地表荷载的季节变化机制来解释^[65]。其作用机制的原理如图4所示:夏季印度季风降雨量丰富,喜马拉雅山前盆地和恒河平原含水量显著增加、像吸满了水的“海绵”,导致地表荷载增加,产生向下的弹性压力;而位于喜马拉雅主断裂北盘的喜马拉雅山,受恒河平原蓄水加载的牵引而发生弹性应变响应,呈现向下和向南的运动趋势(图4(a))。冬天恒河平原含水量降低,导致地表荷载降低,产生向上的应力差;而位于喜马拉雅主断裂北盘

图4 (网络版彩色)卡通图示意恒河平原山前盆地含水量季节性变化使得喜马拉雅造山带应变发生相应的季节性调整,并被GPS大地测量的观测所记录(改自文献[64])

Figure 4 (Color online) Cartoon showing the seasonal variation in water storage in the Ganges plain can cause varying strains in the Himalayan orogeny, which is recorded by continuous GPS monitoring (modified from Ref. [64])

的喜马拉雅山,受恒河平原卸载的影响呈现向北和向上回弹的运动趋势。此外,这种季节性弹性应变叠加在板块汇聚造成的水平缩短之上。与之对应,受夏季恒河平原加载的向下压力的影响,喜马拉雅山产生水平方向的拉张应力,因而降低喜马拉雅主断裂的应力水平,导致微小地震活动性减弱;相反,冬季恒河流域水位的降低和卸载产生的向上回跳,导致喜马拉雅主断裂上盘遭受的挤压应力增加,促进更多小地震的发生。同理,气压、冰雪覆盖也会影响地表物质的荷载,从而引起地壳应力的变化以及地震活动性的季节性浮动^[66,67]。因此,受气候控制的浅地表过程与固体地球深度应力过程存在耦合,参与月-年时间尺度上构造运动。

2.2.2 中长时间尺度(百年~万年)

20世纪人们就已经意识到,冰川的生长和消亡通过重力均衡反弹的机制直接影响到地球深部岩石

圈的应力变化和上地幔的塑性流动^[68]。例如,在阿拉斯加东南部,小冰期后期(~200年之前)的冰退可能直接控制着该区域内现今的地壳变形和地表抬升^[69];同样,近几个世纪以来全球气温上升引起的冰退加速也控制着南美西部的区域隆升和地幔流动^[70]。除了区域尺度的影响,气温变暖造成的冰退现象对地球深部的影响也可能是全球性的:冰川的卸载会通过均衡反弹控制深部地幔的流动,同时冰川消融造成的全球海平面上升会增加大陆架和洋盆的负荷,从而改变下部地壳的应力条件和地震活动性^[68]。除此之外,最近研究揭示气候和火山活跃程度之间也存在明显联系,间冰期,陆地上冰川消融地区火山活跃程度明显增强^[71,72],这可能与冰川卸载导致的地幔上涌和岩石圈减压熔融增强相关^[73,74]。反过来,间冰期火山作用会提高空气中二氧化碳的释放量,从而促进冰川融化速度,这种正反馈会加快冰期到间

冰期的进程^[75]。

构造-地表过程-气候之间的相互作用也会发生在人类活动的时间尺度(百十年~千年),因此其影响具有重要的社会意义。沉积和地貌特征中保存了过去大地震和变形的记录,因此为评估活动断层的复发间隔和地震危险性提供了重要数据。在地表过程速率高的地区,沉积加载和侵蚀卸载量可以引起断面上库伦应力的时空变化,因而加快或减慢活动断层面上应力加载的速率,影响地震复发的时间间隔。这种认识挑战了传统上认为板块运动的远场匀速加载使得断层均稳态活动的观点^[76],对地震灾害、地震丛集、断层生长、以及断层相互作用均具有重要意义。

2.2.3 长时间尺度(百万年)

在数十万~数百万年的造山时间尺度上,气候与深部构造之间的相互影响也较普遍。气候可以产生不同类型的侵蚀作用并引起不同区域之间的侵蚀速率差异,这些空间上的侵蚀差异往往会影响和改变地壳深部的物质运移和应力状态。例如,新生代晚期北半球的冰川作用被认为直接影响了阿拉斯加St. Elias山系^[77]和南安第斯山脉^[78]的剥露和变形,以及造山带的地形地貌演化。阿拉斯加St. Elias山系和南安第斯山脉中纬度区,迎风坡冰川物质平衡线部位冰川流动速率大,冰川刨蚀作用强,对应着磷灰石(U-Th)/He和FT年龄降低的条带状分布^[77,78],而南安第斯山脉高纬度区却没有这种现象^[78],说明了冰川刨蚀作用的不同影响。降雨导致的侵蚀差异也同样会控制造山带的构造活动和构造变形的长期样式,比如,侵蚀量大小可能影响造山楔的前展式发育、稳定或后退^[4,79]。Montgomery等人^[80]指出南美大陆安第斯山链的地形因子,如造山带宽度、最高海拔、海拔分布和山体对称性等从赤道到南纬60°沿纬向变化特征与气候的纬向分带有很强的空间相关性,因此认为,气候条件如降水量和冰川的发育程度决定了一个造山带的大尺度宏观特征。

在喜马拉雅这一地球上最活跃的陆陆碰撞造山带,构造运动、降水和侵蚀等过程的发生频率和速率均较高,三者之间在长时间尺度的耦合和相互作用的方式是构造地貌学研究的热点之一。数值模拟和观测结果表明,山体的地形效应导致降水和侵蚀差异可以解释一些构造活动的样式和速率^[52,53,81-84]。当迎风坡接受大量降水而发生局部强侵蚀时,可以导致热而低黏度的中下地壳岩石以管道流的形式沿

着带状或局部区域抬升上涌至地表^[81]。这种对构造的正反馈作用可用来解释喜马拉雅和其他一些活动造山带百万年时间尺度的构造样式和构造活动性,高喜马拉雅变质带的出露和藏南穹隆的差异隆升,也为下地壳流的高原变形模式提供了支持证据^[52,83,85]。东、西喜马拉雅构造结是新生代印度和欧亚大陆强烈汇聚的前端犄角部位,构造作用强烈,丰沛的降雨和冰川的发育使得该地区形成深切河谷和达6000 m的地形高差。地表剥蚀作用强烈,可见<1 Ma的岩石出露地表,这表明抬升-剥露速率异常快(~10 mm/a),区地貌演化迅速。Zeitler等人^[86]基于喜马拉雅东西构造结地区河流地貌特征、侵蚀速率空间分布、地质构造和变质作用等观测和数据,提出了广受关注的“构造动脉瘤”(tectonic aneurysm)模式^[86,87],强调浅表快速剥蚀与深部地壳熔融等深部地质过程的耦合(图5(a))。因此,东、西构造结地区局部的、快速的侵蚀与深部地质过程之间形成正反馈的作用。

相反,构造运动也通过主导地形演化和改变地貌格局影响着全球、区域或者局部的气候变化。例如,南极洲大陆和澳大利亚大陆的裂解,以及随后南美洲和南极洲之间的德雷克海峡的打开,催生绕极环流的出现,阻滞低纬的暖湿气流继续向南输送,导致南极冰盖逐渐发育,加上印尼水道、巴拿马地峡的关闭促使新生代全球气候逐渐变冷^[88,89]。新生代早期,印度板块与欧亚大陆南缘发生硬碰撞,塔里木盆地西南缘和藏南地区同时发生海退,随着这一过程持续进行,亚洲大陆面积逐渐增加,伴随着青藏高原的整体抬升,新特提斯洋在南、西两个方向同时退却,大陆度不断加强,不仅加强亚洲的季风环流,阻挡暖湿气流向亚洲内陆输送并加剧亚洲内陆干旱化^[8,90,91],同时快速的化学侵蚀降低了大气中二氧化碳含量从而影响全球气温^[54,60,92,93]。

2.3 构造在构造-气候-地表过程耦合中的主导角色

如果构造变形和侵蚀过程之间存在强烈耦合的话,那么耦合作用应该最能体现在地球上岩石抬升速率最高、侵蚀速率最快的地方。在青藏高原东、西构造结地区,岩石抬升和河流下切速率非常高(>5 mm/a),强烈的河流下切形成壮观的深切峡谷地貌。但在这地貌景观演化速率非常快的地区,是构造过程还是地表过程起主导作用?需要精确确定启动或发生变化的

图 5 (网络版彩色)喜马拉雅东构造结地区河流侵蚀与构造相互作用的两个模型示意图。(a)“构造动脉瘤”模型强调河流快速侵蚀搬运作用驱动深部岩石局部快速抬升(改自文献[86]);(b)深部构造的拱抬作用造成了雅江裂点的发育和上游淤积,河流形态被动调整(改自文献[6])

Figure 5 (Color online) Cartoons showing two competing models for exhumation and river development at the Himalayan syntaxes. (a) Tectonic aneurysm model emphasize the excavation by river erosion causing rapid focused uplifting of rock from depth (modified from Ref. [86]); (b) deformation at depth caused the steepening and the development of knickzone on the lower reach of the Yalung river, and backtilting of the river profile and tectonic ponding on the upper reach (modified from Ref. [6])

时间.但在实际研究中,这是难度较大的课题,因此最容易出现“鸡生蛋”和“蛋生鸡”的悖论问题^[5].

基于这些地区的其他共同特征,如高级变质岩石广泛出露,高地温梯度和高热流值,局域化小范围的圈闭性高应变区与挤压和走滑相伴,岩石的低温热年代年龄与周围地区相比异常年轻等^[86,87,94~96],“构造动脉瘤”模型中(图5(a))河流像吸尘器一样通过侵蚀搬运把浅表冷的上地壳岩石快速带走,快速的下切和侵蚀作用引起较热的地壳物质上涌,岩石发生减压部分熔融,并改变地壳热结构,使正下方的地温梯度加大,等温线上拱(岩石温度大于周围同一深度).地壳物质的强度随温度升高而降低,这种温度相依性进一步降低地壳物质黏度和流动阻力,使得深部物质弱化并局部发生高应变,与侵蚀速率小的周围地区形成强烈反差.因此,河流搬运物质的能力造成岩石高速率抬升和局部地区高应变.该模型强调地表侵蚀过程的卸载作用对构造作用的控制^[86,87,94,97,98],在提出后相当长一段时间里有较强的学术影响力.

最近Wang等人^[6]对东构造结裂点带上游埋藏的雅鲁藏布江古河道的研究,提出反对“构造动脉瘤”模型的证据.他们对现今宽度达1 km的河道内堆积的河湖相沉积开展厚度分布研究,发现河床下淤积的沉积物厚度呈楔形,最深处位于尼洋河与雅鲁藏布江的交汇处,并往上游和下游厚度减小,这与钻孔结果一致.对钻探获得的河谷底部砂层的¹⁰Be/²⁶Al

测年结果表明,南迦巴瓦和加拉白垒块体至少从2~2.5 Ma开始加速构造隆升,古河道形态被动变形,形成分隔上游冲填楔和下游陡峭大峡谷的巨型裂点(图5(b)).这些发现表明在构造-气候相互作用中,构造是主因,深部过程是驱动,大峡谷内高侵蚀速率是快速构造抬升的直接响应.此外,喜马拉雅东构造结地区的碎屑矿物的U-Pb, ⁴⁰Ar/³⁹Ar, FT和(U-Th)/He定年结果显示该地区剥蚀速率在5~7 Ma发生重大变化,晚于锆石年龄谱系物源示踪方法得到的雅江贯通的时间,但早于北半球第四纪气候变化的启动时间^[68,99~101].由此,这些研究从不同侧面限定了构造、气候和地表作用过程的启动时间,限定了这些过程的先后主次及相互作用的关系.因此这些学者认为,最近地质时期喜马拉雅东构造结构造隆升加速,使得雅鲁藏布江河流巨大裂点稳定在地形陡降的高原边界部位,否定了之前提出的雅鲁藏布江大峡谷起源于第四纪年轻河流袭夺或冰川坝作用等假说^[102,103].

2.4 “构造-气候-地表过程相互作用”对造山带演化的启示意义

构造、气候和侵蚀过程相互作用对理解造山带的地形演化有重要的启示意义,体现在以下4个方面.

2.4.1 在构造-气候-地表过程相互作用的认识框架下,构造变形不等于地形生长

England和Molnar^[54]提出,地表抬升是岩石抬升

与包括沉积和地表侵蚀过程的总和效应：岩石抬升速率(rock uplift)=地表抬升速率(surface uplift)+侵蚀速率(erosion)。测量岩石抬升速率的方法比较直接，例如低温热年代学方法得到的岩石冷却历史提供了计算岩石抬升速率的基础数据。现有的多阶段封闭温度热年代学方法，提供从地壳不同深度开始起算的隆升剥蚀的平均速率。但是量化地表抬升或抬升速率的方法比较少，往往是使用间接的且常常富有争议的代用指标。这3个变量的速率计算中参考框架并不一致。计算岩石抬升和侵蚀速率时通常是以过去地表面为基准面。而地表抬升或者下降指地表海拔高度的变化，以海平面为基准面。早期研究中常见一些概念互换，比如将岩石抬升等同于地表抬升，将热年代学方法得到的岩石冷却年龄等同于构造运动的时代，基于冷却年龄和地温梯度获得的岩石抬升速率(rock uplift rate)等同于地表抬升速率(surface uplift rate)，这其中往往假定侵蚀量可以忽略不计。

随着研究的深入，越来越多证据表明侵蚀过程和气候影响构造运动，其中侵蚀作用不容忽视，因而上述的简化等同会造成数据解释方面有较大的偏差^[104]。Willett^[53]利用涵盖构造、气候与侵蚀过程的数值模拟，再现了汇聚板块边界碰撞造山带的地形演化(图6)。由于水汽和风向的关系，造山带迎风坡遭受的侵蚀量远远大于背风坡，这一非对称性影响了深部物质的运动轨迹，一部分地壳物质并未俯冲到深部而是在浅部发生侧向运移并随着剥蚀过程带出了造山带，因此侵蚀量平衡了一部分地壳水平缩短量。当造山带构造与侵蚀达到平衡时，岩石抬升量(rock uplift)与侵蚀量(erosion)相等，平均地形保持不变，并且地表抬升(surface uplift)为零。上述数值模拟工作说明，构造变形和岩石抬升不等同于地形生长，当一个地区侵蚀与抬升达到平衡时，地表抬升等于零(图6)。在这种条件下，构造抬升不再使山脉更高，低温热年代学数据得到的岩石抬升速率常常代表的是侵蚀速率。因此，当前低温热年代学研究文献中不乏出现隆升剥蚀速率(exhumation rate)与侵蚀速率(erosion rate)互换的例子。

2.4.2 沉积序列是构造、气候和地表过程共同作用的产物

保存在造山带邻近盆地内的沉积序列被常常用于反推山脉或高原抬升历史。比如，用沉积速率显著增加或区域性特征砾岩的出现来示踪高原或山链抬

图6 (网络版彩色)构造、气候和地表过程相互作用共同塑造了地貌地形(据文献[53]修改)。数值模拟表明，气候控制的、具空间差异的侵蚀作用影响着造山带的形态特征。当达到均衡状态时，板块汇聚的物质增量与地表侵蚀量相同，山体的平均地形保持不变，山脉的地表抬升为零

Figure 6 (Color online) Tectonics, climate and surface processes interact in shaping the landscape (modified after Ref. [53]). Numerical modeling shows that climate-controlled, spatially varying erosion affects the topography of orogen. In steady-state, material influx by convergence is balanced by surface erosion, thus the mean topography and general shape of the orogen stay constant, and surface uplift is zero

升的启动。青藏高原周边出露一系列的标志性砾岩，如高原西北部西昆仑山山前的西域砾岩，祁连山山前玉门砾岩，积石山山前的积石砾岩，高原东缘的大邑砾岩等。早年研究中把高原前陆盆地中砾岩的出现作为高原开始隆升或隆升加剧的标志，从而认为上新世以来高原开始强烈隆升^[105~109]。同样地，美国地质学家也发现在洛基山脉和高平原地区(Rocky Mountains and High Plains)以及拉勒米造山带(Laramie Mountains)等山系周边沉积盆地中~4 Ma以来沉积速率突然加速或沉积物粒度明显变粗，因此推测上新世~第四纪以来造山带发生快速抬升^[110,111]。对此，Zhang等人^[112]指出世界不同地方从2~4 Ma以来均出现沉积速率2~10倍的增加，特别是已知的不活动造山带或构造稳定区在此阶段也显示侵蚀加速的现象。但是全球范围同时出现构造加速的证据不

足,也缺乏地球动力学的机制解释.因此,他们提出气候变化是上新世以来全球侵蚀速率同步增强最有可能的解释^[112,113].

从理论上来说,构造和气候是控制区域侵蚀速率和陆源物质沉积速率的两大因素.一方面构造变形可以增加地形高差,为侵蚀的两种主要营力河流和冰川提供势能;同时构造抬升也为地表侵蚀提供来自深部的新鲜物质;另一方面,全球或局部气候发生变化时也能影响侵蚀营力的强度和演化.因此,构造作用或气候条件变化均可以产生侵蚀速率的变化,侵蚀产物堆积区沉积速率加大或沉积相变粗等响应.此外,源区岩性抗风化能力的差异或者沉积中心与构造变形前锋带距离的变化,也可以导致堆积区相同的变化.也就是说,因为多种过程可以产生同样沉积特征响应,所以利用沉积序列特征反推成因过程时就会面临多解性问题.故此,或者构造成因或者气候成因的排他性成因机制结论也往往难以令人信服.

2.4.3 “侵蚀造山论”过于强调气候和侵蚀对构造的反馈作用

山脉的形成蕴含着地球表面数百万到亿万年以来的演化信息,是标识构造作用发生的强有力证据.20世纪90年代初,研究人员开始认识到气候和侵蚀等地表和外圈层也参与到固体地球的构造运动中,但其作用在之前的研究中被低估.在此背景下,有人提出“侵蚀造山”概念^[3,86,94],强调侵蚀在造山过程的主导地位,提出侵蚀不仅参与建造山脉的过程,而且引领着地壳深部的构造活动.这种观念吸引更多学者去关注和寻找气候和侵蚀对构造的反馈证据和影响程度.

但现在越来越多的研究发现“侵蚀造山”理论过于强调侵蚀在三者相互作用中的主导地位.如前所述,Wang等人^[6]在喜马拉雅东构造结的研究发现古河道存在向上游反翘现象,提出东构造结遭受拱抬作用导致河道发生被动变形,并逐渐形成现今上游平直淤积段与下游裂点陡变带并列的形态特征.这表明在构造-气候相互作用过程中,构造活动起引领作用,而河流侵蚀的增强是被动响应,进而有力地证明“侵蚀造山”观点强调侵蚀控制构造的主次观存在重大偏差^[114].

“侵蚀造山”观点的证据往往是区域上一系列现象的空间相关性,如强降水量、强侵蚀速率与高岩石

抬升量和高海拔与高地形起伏等之间的空间对应.但已有研究发现,这些现象的空间相关性并未严格对应,不同地区构造-气候-侵蚀相互作用的强弱程度存在很大差别,并非完全符合这一简单的对应规律^[115,116].因而严格说来,这样的空间对应关系不能证明地表侵蚀作用可以引发或启动相应的构造变形.

构造-气候-侵蚀能发生强烈耦合过程并形成正反馈作用可能需要特殊的构造背景,如强烈挤压或汇聚的构造应力场.Bendick和Ehlers^[117]指出,喜马拉雅山脉东、西构造结和阿拉斯加半岛St. Elias山系是验证“构造动脉瘤”学说3个典型地区,而这些地区均位于板块几何形态发生重大转折处.数值模型结果证明向下俯冲板块的刚性使得位于几何转折处的俯冲板片较浅,对上覆板块造成刚性拱抬效应.Simpson^[118]的数值模拟结果证明当一个地区承受强烈的构造挤压时,横穿过褶皱或逆冲断裂的河流持续下切对褶皱的抬升量有局部、背形形态放大效应.反之,如果没有强烈的构造应力场背景,河流下切就没有将变形局部放大的效果.因此,无论是深部构造的几何形态或其他控制因素形成强烈构造挤压环境,亦或是观测证据,都说明构造-气候-侵蚀发生强烈耦合的相互作用机制在于“自下而上”的构造决定,而非“自上而下”的侵蚀启动^[6,96,117,119,120].

2.4.4 地壳均衡作用导致山脊抬升但平均地形降低

地壳均衡(isostasy)是刚性地壳和相对塑性的地幔之间重力均衡的状态.一级近似下,地壳均衡可以简化为较轻岩石柱体漂浮在较重的地幔上的平衡状态,这直接体现了浮力原理:物体浸润在液体中受到相当于排开液体重量相当的浮力,与重力平衡,使之漂浮.地壳“漂浮”的高度取决于其密度、厚度和地幔的密度,因此地壳均衡可以用来解释为什么地表存在不同的地形高度.同时,地壳均衡理论提供了一个区域加载或卸载发生垂向运动时地形如何变化的简单物理模型.地质时间尺度上,地壳均衡过程表现为地壳加载对地幔施加应力,地幔侧向流动进行调整,而地表侵蚀、水体蒸发或冰川融化等物质卸载往往通过地壳反弹实现重力均衡补偿.基于均衡理论,河流或冰川的剥蚀作用增加时,侵蚀卸载造成的均衡反弹效应驱使山脉最高点的抬升,与之相伴河流下切更深,河谷更宽,地形高差加剧.值得注意的是,侵蚀虽然可以导致局部山峰高度和地形起伏增加,但如在整个造山带尺度上,侵蚀-地壳均衡作用的综合

结果是降低造山带平均高程, 而非增高. 假定典型地壳密度为 2.75 g/cm^3 、地幔密度为 3.3 g/cm^3 (即地壳密度是地幔的 $5/6$), 那么侵蚀导致的实际平均高程的减少量是侵蚀厚度的 $1/6$ ^[5,54,121~125] (图7(a)). 也就是说, 每侵蚀掉 1 km 的岩石, 地壳均衡反弹将导致岩石大约 0.85 km 的抬升量($\sim 1 \times 5/6$), 而平均地表高度下降 0.15 km ($\sim 1 \times 1/6$)^[5,122,125]. 同理, 地壳增厚将导致地表抬升, 但因增厚地壳的均衡下沉, 地表抬升的幅度仅为地壳增厚量的 $1/6$. 我们可以计算, 平均海拔为 3.5 km 的山脉如果夷平至海平面的话, 对应的侵蚀量将

大致为夷平开始前海拔高度的6倍, 即 21 km , 对应 17.5 km 的岩石抬升量, 这也对应着莫霍面的抬升量 (图7(b)). 这种量级估算有助于制约构造系统的时空演化, 一个典型的例子是评估青藏高原抬升演化模型. 早期的高原抬升模型认为高原面在 $\sim 18 \text{ Ma}$ 达到海拔 4 km , $\sim 10 \text{ Ma}$ 时夷平至 2 km , 按照地壳均衡原理, 如果该模型成立, 地表侵蚀量为 12 km , 平均侵蚀速率为 1.5 mm/a ; 但实际上我们知道高原内部侵蚀速率不大于 0.05 mm/a , 高原边界带山脉, 如三江地区、龙门山地区和祁连山地区普遍不大于 0.5 mm/a ,

图 7 (网络版彩色)卡通图简示地壳均衡原理解释岩石抬升, 地表抬升与侵蚀之间的关系. (a) 河谷下切和边坡侵蚀的卸载可以使得山脉峰脊的均衡抬升, 但同时平均海拔降低, 地壳厚度减薄和莫霍面(假定的地壳均衡面)深度上移(改自文献[122]); (b) 依据地壳均衡原理, 岩石抬升量和地表抬升量(降低)是地壳和地幔的密度以及侵蚀量的简单函数关系(修改自文献[54])

Figure 7 (Color online) Cartoons showing the principle of crustal isostasy in explaining the relationship between rock uplifting, surface uplifting and erosion. (a) Unloading by river incision and hillslope erosion will cause uplift of the ridge top and peak, but at the same time, causing the crustal thickness, the Moho depth and average elevation to decrease (modified after Ref. [122]); (b) according to isostasy, rock uplift and surface uplift (positive or negative) are a function of the crustal and mantle density and the magnitude of erosion (modified from Ref. [54])

极端的例子如东、西构造结5~10 mm/a仅出现在非常局部的小面积范围内(<100 km)^[97], 难以维持整个高原地区的1.5 mm/a高侵蚀速度, 因此“快速夷平”的模型有待商榷.

在构造活跃的造山带, 地貌对气候变化的响应特点决定了地形高差起伏的增加有一定的上限, 不会无限增加^[125]. 在这个意义之下, 河流或冰川的剥蚀作用对应的均衡反弹对造山带峰顶的抬升有一定的作用, 与构造作用造成的抬升相比, 其量值有限而居于次要地位. 因此, 需要区分真实的构造因素造成的地表隆升和局部上覆物质剥蚀造成的均衡抬升.

3 构造地貌研究中的前沿问题和展望

构造-气候-地表过程的相互作用是当今地球科学界讨论的热点问题, 这一研究领域发展前景广阔. 日益革新的技术手段驱动着新发现、新认知, 但仍然有众多问题亟需解决. 当前的研究需要进一步论证已有模型的边界条件适用范围, 探讨圈层和过程之间相互作用的强度和意义, 综合理解丰富的研究个例, 进而深入理解控制地貌演化的基本因素和普适性规律. 一系列前沿科学问题有待探索揭示, 这些问题包括但不限于:

(1) 建立和完善地表物质运移方程, 用于描述大气圈、水圈和岩石圈界面上与地貌过程相关的物质运移规律; 目前对一些基本的地貌过程, 如滑坡、冰川侵蚀和化学侵蚀等, 仍然没有较好的定量方程描述^[126,127].

(2) 评价气候、构造和侵蚀过程在造山带地貌演化进程中的作用与贡献, 解析短时间尺度地貌变化对浅部地质过程的影响以及长时间尺度上地质作用对地貌景观演化的影响, 解读侵蚀-岩石抬升速度与气候指标在不同时间尺度的记录.

(3) 在沉积学、地貌学、地质年代学、地球化学和地壳形变等记录中寻找更深部如地幔地质过程参与相互作用的证据, 以及在何种条件下能区分地幔过程或气候驱动的地形演化.

(4) 瞬态(transient)或过渡态(transitional)地貌与地表过程的研究: 即构造或气候等边界条件发生变化, 地貌格局被打破但还没有达到新的平衡态的过程中不断变化的过渡型地貌, 如河流裂点的迁移过程, 而之前的构造-气候-侵蚀相互作用关系研究多集中在针对平衡态(steady-state)地貌的研究.

(5) 浅表生物过程在大陆地貌景观演化中的作用程度, 及浅表过程在存矿类型和规模中的重要作用.

与其他地表过程的交叉研究也将成为构造地貌学发展的增长点. 例如生物群落在造山带的动态过程中也起着关键作用. 生物过程制约风化、土壤发育和山坡侵蚀的速率, 进而强烈地影响着进入河道的沉积物数量、粒径和组成. 这些沉积物进一步影响基岩的侵蚀速率、河道的水力学特征以及根植在当地的生态系统. 浅表生物过程还强烈影响着人们赖以生存的地表水和地下水的地球化学性质. 岩石圈动态构造过程与浅表发生的生物地貌过程之间存在什么样的互馈关系? 微生物-矿物反应对风化作用的影响程度如何? 生物-构造-气候等多种过程是如何相互作用, 进而影响全球的碳循环? 构造活动在物理风化和化学风化以及全球循环中所起的作用? 与之对应, 近十多年地球关键带(critical zone)成为备受瞩目的研究热点^[128]: 关键带是指具非均匀特征的近地表环境, 根植其中的岩石、土壤、水、空气和生物体之间的复杂相互作用控制着自然栖息地, 并决定着生命维持所需资源的可利用性(NRC, 2001^[129]). 各个国家以建立野外观测基地(critical zone observatory, CZO)网络为锚点开展综合研究, 使我们逐渐深入认识人类赖以生存的界面带所发生的各种丰富和动态过程.

近年来人类活动对固体地球的影响也越来越明显. 比如水库的修建, 油田和页岩气开发中向地下注水, CO₂封存等活动诱发地震或无震滑移, 使一些构造活动不强地区的地震活动性明显增加, 诱发地震的震级可达5~6级^[130,131]. 人们关心其地震安全隐患, 驱动了一波对诱发地震的研究热潮. 观测数据的增加同时也为理解断裂带行为、地震发生、和破裂过程等理论研究提供窗口^[132].

通常一个学科的生命力往往与社会发展的需求和技术进步的趋势相契合. 构造-气候-侵蚀相互作用成为持续性研究热点的驱动力表现在: (1) 有助于理解滑坡、泥石流、地震等自然灾害, 为政府决策、防震减灾提供科学依据; (2) 有助于理解人类对气候和环境的影响, 为可持续性发展提供地球科学角度解读. 人类对气候和环境的改造越来越广泛, 以至于一个新的地质时代“人新世”已经到来^[133]; (3) 与地球表面面貌描述、动态变化高精度影像和高分辨率数字地形等社会和科学发展趋势相契合, 这对于重大灾害

事件如地震、洪水等的救援工作有重要帮助；(4) 与高精度测年、质谱技术和地球化学的发展互相促进：如 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、(U-Th)/He和FT等低温-超低温热年代学以及以 ^{10}Be 和 ^{21}Ne 为代表的稳定或非稳定同位素宇宙成因核素测年，以及基于氢氧同位素的古高度和古温度计等技术。

4 结语

本文尝试对构造地貌学这一发展迅速的新兴交叉学科和定量地貌学近二三十年的研究发展进行了

回顾和综述。介绍了构造-气候-地表过程相互作用的内涵以及阐述不同时空尺度上的重要研究实例。系统梳理了构造、气候、地表过程以及相互作用对理解造山带演化的启示意义，如在构造、气候和地表过程相互作用的理论框架下，构造变形不等于地形生长；沉积序列是构造、气候和侵蚀共同作用的产物；构造在与气候和地表过程的耦合中占主导角色；“侵蚀造山论”过于强调气候对构造的反馈作用；地壳均衡造成山脊抬升但降低平均地形等。最后简要总结构造地貌研究中的前沿问题和研究机遇。

致谢 感谢论文撰写过程中同行讨论反馈，感谢审稿专家的宝贵意见。

参考文献

- Burbank D W, Anderson R S. Tectonic Geomorphology. 2nd ed. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2011, 19: 198–200
- Willett S D, Hovius N, Brandon M T, et al. Tectonics, Climate, and Landscape Evolution. Boulder, USA: Geological Society of America, 2006, 398: vii–xi
- Pinter N, Brandon M T. How erosion builds mountains. *Sci Am*, 1997, 276: 74–79
- Avouac J P. Mountain building, erosion, and the seismic cycle in the Nepal Himalaya. *Adv Geophys*, 2003, 46: 1–80
- Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: Chicken or egg? *Nature*, 1990, 346: 29–34
- Wang P, Scherler D, Liu-Zeng J, et al. Tectonic control of Yarlung Tsangpo Gorge revealed by a buried canyon in southern Tibet. *Science*, 2014, 346: 978–981
- Molnar P, England P, Martinod J. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon. *Rev Geophys*, 1993, 31: 357–396
- An Z, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since late Miocene times. *Nature*, 2001, 411: 62–66
- Wang P X. Cenozoic deformation and history of sea-land interactions in Asia (in Chinese). *Earth Sci-J China Univ Geosci*, 2005, 30: 1–18 [汪品先. 新生代亚洲形变与海陆相互作用. *地球科学*, 2005, 30: 1–18]
- Sun J M. Case study based on earth system science theory—Geomorphologic, environmental, and climatic effects of the tectonic uplift of the Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 2014, 53: 1–9 [孙继敏. 地球系统科学的研究范例——青藏高原隆升的地貌、环境、气候效应. *中山大学学报(自然科学版)*, 2014, 53: 1–9]
- von Blanckenburg F, Willenbring J K. Cosmogenic nuclides: Dates and rates of earth-surface change. *Elements*, 2014, 10: 341–346
- Ehlers T A, Farley K A. Apatite (U-Th)/He thermochronometry: Methods and applications to problems in tectonic and surface processes. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 206: 1–14
- Willett S D, Slingerland R, Hovius N. Uplift, shortening, and steady-state topography in active mountain belts. *Am J Sci*, 2001, 301: 455–485
- Haugerud R A, Harding D J, Johnson S Y, et al. High-resolution lidar topography of the Puget Lowland, Washington—A bonanza for earth science. *GSA Today*, 2003, (6): 4–10
- Hilley G E, Ramón Arrowsmith J. Geomorphic response to uplift along the Dragon's back pressure ridge, Carrizo Plain, California. *Geology*, 2008, 36: 367–370
- Liu J, Chen T, Zhang P Z, et al. Illuminating the active Haiyuan fault, China by airborne light detection and ranging (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 41–45 [刘静, 陈涛, 张培震, 等. 机载激光雷达扫描揭示海原断裂带微地貌的精细结构. *科学通报*, 2013, 58: 41–45]
- Oskin M E, Arrowsmith J R, Hinojosa C A, et al. Near-field deformation from the El Mayor-Cucapah earthquake revealed by differential lidar. *Science*, 2012, 335: 702–705
- Westoby M J, Brasington J, Glasser N F, et al. 'Structure-from-motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 2012, 179: 300–314

- 19 Thoma D P, Gupta S C, Bauer M E, et al. Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment. *Remote Sens Environ*, 2005, 95: 493–501
- 20 Cobby D M, Mason D C, Davenport I J. Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling. *Isprs J Photogramm Remote Sens*, 2001, 56: 121–138
- 21 French J R. Airborne lidar in support of geomorphological and hydraulic modelling. *Earth Surface Proc Landf*, 2010, 28: 321–335
- 22 Challis K. Airborne laser altimetry in alluviated landscapes. *Archaeol Prospect*, 2006, 13: 103–127
- 23 Nelson P A, Smith J A, Miller A J. Evolution of channel morphology and hydrologic response in an urbanizing drainage basin. *Earth Surface Proc Landf*, 2006, 31: 1063–1079
- 24 Notebaert B, Verstraeten G, Govers G, et al. Qualitative and quantitative applications of Lidar imagery in fluvial geomorphology. *Earth Surface Proc Landf*, 2009, 34: 217–231
- 25 Gosse J C, Phillips F M. Terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides: Theory and application. *Quat Sci Rev*, 2001, 20: 1475–1560
- 26 Lal D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: *In situ* nuclide production rates and erosion models. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 104: 424–439
- 27 Small E E, Anderson R S, Repka J L, et al. Erosion rates of alpine bedrock summit surfaces deduced from *in situ* ^{10}Be and ^{26}Al . *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 150: 413–425
- 28 von Blanckenburg F. The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 237: 462–479
- 29 Charreau J, Blard P H, Puchol N, et al. Paleo-erosion rates in central Asia since 9 Ma: A transient increase at the onset of quaternary glaciations? *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 304: 85–92
- 30 Heimsath A M, Dietrich W E, Nishiizumi K, et al. Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth. *Geomorphology*, 1999, 27: 151–172
- 31 Schaller M, Ehlers T A, Blum J D, et al. Quantifying glacial moraine age, denudation, and soil mixing with cosmogenic nuclide depth profiles. *J Geophys Res-Earth Surf*, 2009, 114: 18
- 32 Kurz M D. *In situ* production of terrestrial cosmogenic helium and some applications to geochronology. *Geochim Cosmochim Acta*, 1986, 50: 2855–2862
- 33 Schäfer J M, Ivy-Ochs S, Wieler R, et al. Cosmogenic noble gas studies in the oldest landscape on earth: Surface exposure ages of the Dry Valleys, Antarctica. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 167: 215–226
- 34 Dodson M H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib Mineral Petrol*, 1973, 40: 259–274
- 35 Gleadow A J W. Fission-track dating methods: What are the real alternatives? *Nucl Tracks*, 1981, 5: 3–14
- 36 Reiners P W, Brandon M T. Using thermochronology to understand orogenic erosion. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2006, 34: 419–466
- 37 Gleadow A J W. Fission track dating methods: A manual of principles and techniques, 1984
- 38 Donelick R A, O’Sullivan P B, Ketcham R A. Apatite fission-track analysis. *Rev Mineral Geochem*, 2005, 58: 49–94
- 39 Palissari R, Guedes S, Curvo E A C, et al. Extrapolation of zircon fission-track annealing models. *Radiat Meas*, 2013, 50: 192–196
- 40 Farley K A. (U-Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications. *Rev Mineral Geochem*, 2002, 47: 819–844
- 41 Wolf R A, Farley K A, Kass D M. Modeling of the temperature sensitivity of the apatite (U-Th)/He thermochronometer. *Chem Geol*, 1998, 148: 105–114
- 42 Braun J. Strong imprint of past orogenic events on the thermochronological record. *Tectonophysics*, 2016, 683: 325–332
- 43 Gallagher K, Stephenson J, Brown R, et al. Low temperature thermochronology and modeling strategies for multiple samples 1: Vertical profiles. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 237: 193–208
- 44 Wang Y. Some thoughts on tectonothermochronology (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2004, 11: 435–443 [王瑜. 构造热年代学——发展与思考. *地学前缘*, 2004, 11: 435–443]
- 45 Chen W, Wan Y S, Li H Q, et al. Isotope geochronology: Technique and application (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2011, 85: 1917–1947 [陈文, 王渝生, 李华芹, 等. 同位素地质年龄测定技术及应用. *地质学报*, 2011, 85: 1917–1947]
- 46 Willett S D, Brandon M T. Some analytical methods for converting thermochronometric age to erosion rate. *Geochem Geophys Geosyst*, 2013, 14: 209–222
- 47 Avdeev B, Niemi N A, Clark M K. Doing more with less: Bayesian estimation of erosion models with detrital thermochronometric data. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 305: 385–395
- 48 Enkelmann E, Zeitler P K, Pavlis T L, et al. Intense localized rock uplift and erosion in the St Elias orogen of Alaska. *Nat Geosci*, 2009, 2: 360–363
- 49 Bernet M, Spiegel C. Detrital thermochronology: Provenance analysis, exhumation, and landscape evolution of mountain belts. *Spec Pap Geol Soc Am*, 2004, 378: 1–126

- 50 Duvall A R, Clark M K, Avdeev B, et al. Widespread late Cenozoic increase in erosion rates across the interior of eastern Tibet constrained by detrital low-temperature thermochronometry. *Tectonics*, 2012, 31: 23
- 51 Zheng D W, Wang F, Zhang P Z, et al. Apatite (U-Th)/He dating method—A low temperature thermochronometer. *Seismol Geol*, 2000, 22: 427–435 [郑德文, 王非, 张培震. 磷灰石 U-Th/He 法——一种低温热年代计. *地震地质*, 2000, 22: 427–435]
- 52 Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M, et al. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 2001, 414: 738–742
- 53 Willett S D. Orogeny and orography: The effects of erosion on the structure of mountain belts. *J Geophys Res: Solid Earth*, 1999, 104: 28957–28981
- 54 England P, Molnar P. Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks. *Geology*, 1990, 18: 1173–1177
- 55 Gaillardet J, Dupre B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chem Geol*, 1999, 159: 3–30
- 56 Galy V, France-Lanord C, Beyssac O, et al. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system. *Nature*, 2007, 450: 407–410
- 57 Li G, Hartmann J, Derry L A, et al. Temperature dependence of basalt weathering. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 443: 59–69
- 58 Hemingway J D, Hilton R G, Hovius N, et al. Microbial oxidation of lithospheric organic carbon in rapidly eroding tropical mountain soils. *Science*, 2018, 360: 209
- 59 Maher K, Chamberlain C P. Hydrologic regulation of chemical weathering and the geologic carbon cycle. *Science*, 2014, 343: 1502–1504
- 60 Pagani M, Zachos J C, Freeman K H, et al. Marked decline in atmospheric carbon dioxide concentrations during the Paleogene. *Science*, 2005, 309: 600–603
- 61 Torres M A, West A J, Li G. Sulphide oxidation and carbonate dissolution as a source of CO₂ over geological timescales. *Nature*, 2014, 507: 346–349
- 62 Willett S D, Schlunegger F, Picotti V. Messinian climate change and erosional destruction of the central European Alps. *Geology*, 2006, 34: 613–616
- 63 Liu C, Linde A T, Sacks I S. Slow earthquakes triggered by typhoons. *Nature*, 2009, 459: 833–836
- 64 Bettinelli P, Avouac J P, Flouzat M, et al. Seasonal variations of seismicity and geodetic strain in the Himalaya induced by surface hydrology. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 266: 332–344
- 65 Bollinger L, Perrier F, Avouac J P, et al. Seasonal modulation of seismicity in the Himalaya of Nepal. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L08304
- 66 Gao S S, Silver P G, Linde A T, et al. Annual modulation of triggered seismicity following the 1992 Landers earthquake in California. *Nature*, 2000, 406: 500
- 67 Heki K. Snow load and seasonal variation of earthquake occurrence in Japan. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 207: 159–164
- 68 Stewart I S, Sauber J, Rose J. Glacio-seismotectonics: Ice sheets, crustal deformation and seismicity. *Quat Sci Rev*, 2000, 19: 1367–1389
- 69 Larsen C F, Motyka R J, Freymueller J T, et al. Rapid viscoelastic uplift in southeast Alaska caused by post-little ice age glacial retreat. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 237: 548–560
- 70 Dietrich R, Ivins E, Casassa G, et al. Rapid crustal uplift in Patagonia due to enhanced ice loss. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 289: 22–29
- 71 Jellinek A, Manga M, Saar M. Did melting glaciers cause volcanic eruptions in eastern California? Probing the mechanics of dike formation. *J Geophys Res*, 2004, 109: B09206
- 72 Sigvaldason G E, Annertz K, Nilsson M. Effect of glacier loading/deloading on volcanism: Postglacial volcanic production rate of the Dyngjufjöll area, central Iceland. *Bull Volcanol*, 1992, 54: 385–392
- 73 Jull M, McKenzie D. The effect of deglaciation on mantle melting beneath Iceland. *J Geophys Res: Solid Earth*, 1996, 101: 21815–21828
- 74 MacLennan J, Jull M, McKenzie D, et al. The link between volcanism and deglaciation in Iceland. *Geochem Geophys Geosys*, 2002, 3: 1–25
- 75 Huybers P, Langmuir C. Feedback between deglaciation, volcanism, and atmospheric CO₂. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 286: 479–491
- 76 Steer P, Simoes M, Cattin R, et al. Erosion influences the seismicity of active thrust faults. *Nat Commun*, 2014, 5: 7
- 77 Berger A L, Spotila J A. Denudation and deformation in a glaciated orogenic wedge: The St. Elias orogen, Alaska. *Geology*, 2008, 36: 523–526
- 78 Thomson S N, Brandon M T, Tomkin J H, et al. Glaciation as a destructive and constructive control on mountain building. *Nature*, 2010, 467: 313–317
- 79 Konstantinovskaia E, Malavieille J. Erosion and exhumation in accretionary orogens: Experimental and geological approaches. *Geochem Geophys Geosys*, 2005, 6: Q02006

- 80 Montgomery D R, Balco G, Willett S D. Climate, tectonics, and the morphology of the Andes. *Geology*, 2001, 29: 579–582
- 81 Beaumont C, Jamieson R A, Mai H N, et al. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen. *J Geophys Res Solid Earth*, 2004, 109: B06406
- 82 Reiners P W, Ehlers T A, Mitchell S G, et al. Coupled spatial variations in precipitation and long-term erosion rates across the Washington Cascades. *Nature*, 2003, 426: 645–647
- 83 Hodges K, Hurtado J, Whipple K. Southward extrusion of Tibetan crust and its effect on Himalayan tectonics. *Tectonics*, 2001, 20: 799–809
- 84 Thiede R C, Ehlers T A. Large spatial and temporal variations in Himalayan denudation. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 371–372: 278–293
- 85 Whipple K X. The influence of climate on the tectonic evolution of mountain belts. *Nat Geosci*, 2009, 2: 97–104
- 86 Zeitler P K, Meltzer A S, Koons P O, et al. Erosion, Himalayan geodynamics, and the geomorphology of metamorphism. *GSA Today*, 2001, 11: 4–9
- 87 Koons P O, Zeitler P K, Hallet B. Tectonic aneurysms and mountain building. *Treat Geomorphol*, 2013, 318–349
- 88 Scher H D, Martin E E. Timing and climatic consequences of the opening of Drake Passage. *Science*, 2006, 312: 428–430
- 89 Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 2001, 292: 686
- 90 Abels H A, Dupont-Nivet G, Xiao G Q, et al. Step-wise change of Asian interior climate preceding the Eocene-Oligocene Transition (EOT). *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2011, 299: 399–412
- 91 Sun J M, Liu T S. The age of the Taklimakan Desert. *Science*, 2006, 312: 1621–1621
- 92 Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 1992, 359: 117–122
- 93 Raymo M E. The Himalayas, organic carbon burial, and climate in the Miocene. *Paleoceanography*, 1994, 9: 399–404
- 94 Zeitler P K, Meltzer A S, Brown L, et al. Tectonics and topographic evolution of Namche Barwa and the easternmost Lhasa block, Tibet. *Spec Pap Geol Soc Am*, 2014, 507: 23–58
- 95 Finlayson D P, Montgomery D R, Hallet B. Spatial coincidence of rapid inferred erosion with young metamorphic massifs in the Himalayas. *Geology*, 2002, 30: 219–222
- 96 Burg J P, Nievergelt P, Oberli F, et al. The Namche Barwa syntaxis: Evidence for exhumation related to compressional crustal folding. *J Asian Earth Sci*, 1998, 16: 239–252
- 97 Finnegan N J, Hallet B, Montgomery D R, et al. Coupling of rock uplift and river incision in the Namche Barwa-Gyala Peri massif, Tibet. *Geol Soc Am Bull*, 2008, 120: 142–155
- 98 Koons P O. Mechanical links between erosion and metamorphism in Nanga Parbat, Pakistan Himalaya. *Am J Sci*, 2002, 302: 749–773
- 99 Lang K A, Huntington K W. Antecedence of the Yarlung-Siang-Brahmaputra River, eastern Himalaya. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 397: 145–158
- 100 Lang K A, Huntington K W, Burmester R, et al. Rapid exhumation of the eastern Himalayan syntaxis since the late Miocene. *Geol Soc Am Bull*, 2016, 128: B31419.31411
- 101 Enkelmann E, Ehlers T A, Zeitler P K, et al. Denudation of the Namche Barwa antiform, eastern Himalaya. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 307: 323–333
- 102 Montgomery D R, Bernard H, Liu Y, et al. Evidence for Holocene megafloods down the Tsangpo River gorge, Southeastern Tibet. *Quat Res*, 2004, 62: 201–207
- 103 Korup O, Montgomery D R. Tibetan Plateau river incision inhibited by glacial stabilization of the Tsangpo gorge. *Nature*, 2008, 455: 786–789
- 104 Zheng D W, Zhang P Z, Wan J L, et al. Tectonic events, climate and conglomerate: Example from Jishishan mountain and Linxia basin (in Chinese). *Quat Sci*, 2006, 26: 63–69 [郑德文, 张培震, 万景林, 等. 构造、气候与砾岩——以积石山和临夏盆地为例. 第四纪研究, 2006, 26: 63–69]
- 105 He Y W. The age of formation of the Chengdu basin and features of its early deposits (in Chinese). *Geol Rev*, 1992, 38: 149–156 [何银武. 论成都盆地的成生时代及其早期沉积物的一般特征. 地质论评, 1992, 38: 149–156]
- 106 Li J J, Wen S X, Zhang Q S, et al. Discussion on the age, range and form of the Qinghai-Tibet Plateau uplift (in Chinese). *Sci China*, 1979, 6: 78–86 [李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. 中国科学, 1979, 6: 78–86]
- 107 Li J J, Fang X M. Study on the uplift of Qinghai-Tibet Plateau and environmental changes (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1998, 43: 1568–1574 [李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究. 科学通报, 1998, 43: 1568–1574]
- 108 Huang J Q, Chen B W. On the formation of Pliocene—Quaternary molasses in the Tethy-Himalaya tectonic domain and its relation with the Indian plate motion (in Chinese). In: Book Newsroom in Ministry of Geology and Mineral of China, ed. Scientific Papers on Geology for International Exchange: Prepared for the 26th International Geological Congress. Beijing: Publishing House of Geology, 1980. 1–14 [黄汲清, 陈炳蔚. 特提斯-喜马拉雅构造域上新世-第四纪磨拉斯的形成及其与印度板块活动的关系. 见: 地质部书刊编辑室

编. 国际交流地质学术论文集- 1(构造地质、地质力学). 北京: 地质出版社, 1980. 1-14]

- 109 Zheng H B, Chen H Z, Jin H L, et al. Magnetostratigraphic evidence for the Pliocene-early Pleistocene uplift of the northern Tibetan Plateau (in Chinese). *Marine Geol Quat Geol*, 2002, 22: 57-62 [郑洪波, 陈惠忠, 靳鹤龄, 等. 上新世-早更新世青藏高原北缘隆升的磁性地层学证据. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22: 57-62]
- 110 Blackstone D L. Late Cretaceous and Cenozoic history of Laramie basin region, southeast Wyoming. *Geol Soc Am Mem*, 1975, 144: 249-279
- 111 Hay W W, Shaw C A, Wold C N. Mass-balanced paleogeographic reconstructions. *Geol Rund*, 1989, 78: 207-242
- 112 Zhang P Z, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2-4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates. *Nature*, 2001, 410: 891
- 113 Molnar P. Late cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment: How might climate change have affected erosion rates? *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2004, 32: 67-89
- 114 Whipple K X. Geography can erosion drive tectonics? *Science*, 2014, 346: 918-919
- 115 Godard V, Bourles D L, Spinabella F, et al. Dominance of tectonics over climate in Himalayan denudation. *Geology*, 2014, 42: 243-246
- 116 Scherler D, Bookhagen B, Strecker M R. Tectonic control on 10 Be-derived erosion rates in the Garhwal Himalaya, India. *J Geophys Res Earth Surface*, 2014, 119: 83-105
- 117 Bendick R, Ehlers T A. Extreme localized exhumation at syntaxes initiated by subduction geometry. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 5861-5867
- 118 Simpson G. Role of river incision in enhancing deformation. *Geology*, 2004, 32: 341-344
- 119 King G E, Herman F, Guralnik B. Northward migration of the eastern Himalayan syntaxis revealed by OSL thermochronometry. *Science*, 2016, 353: 800-804
- 120 Seward D, Burg J P. Growth of the Namche Barwa syntaxis and associated evolution of the Tsangpo Gorge: Constraints from structural and thermochronological data. *Tectonophysics*, 2008, 451: 282-289
- 121 Burbank D W. Causes of recent Himalayan uplift deduced from deposited patterns in the Ganges basin. *Nature*, 1992, 357: 680-683
- 122 Montgomery D R. Valley incision and the uplift of mountain peaks. *J Geophys Res: Solid Earth*, 1994, 99: 13913-13921
- 123 Small E E, Anderson R S. Geomorphically driven late Cenozoic rock uplift in the Sierra Nevada, California. *Science*, 1995, 270: 277-281
- 124 Small E E, Anderson R S. Pleistocene relief production in Laramide mountain ranges, western United States: Comment and reply. *Geology*, 1998, 26: 123-126
- 125 Whipple K X, Kirby E, Brocklehurst S H. Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. *Nature*, 1999, 401: 39-43
- 126 Dietrich W E, Perron J T. The search for a topographic signature of life. *Nature*, 2006, 439: 411-418
- 127 Perron J T. Climate and the pace of erosional landscape evolution. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2017, 45: 561-591
- 128 An P J, Zhang Z Q, Wang L W. Review of earth critical zone research (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2016, 31: 1228-1234 [安培浚, 张志强, 王立伟. 地球关键带的研究进展. *地球科学进展*, 2016, 31: 1228-1234]
- 129 Council N R. Basic Research Opportunities in Earth Science. Washington DC: National Academy Press, 2000
- 130 Elsworth D, Spiers C J, Niemeijer A R. Understanding induced seismicity. *Science*, 2016, 354: 1380-1381
- 131 Ellsworth W L. Injection-induced earthquakes. *Science*, 2013, 341: 142
- 132 Galis M, Ampuero J P, Mai P M, et al. Induced seismicity provides insight into why earthquake ruptures stop. *Sci Adv*, 2017, 3: 10
- 133 Waters C N, Zalasiewicz J, Summerhayes C, et al. The anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 2016, 351: 2622

Summary for “构造地貌学: 构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究”

Tectonic geomorphology: An interdisciplinary study of the interaction among tectonic climatic and surface processes

Jing Liu-Zeng^{1*}, Jinyu Zhang¹, Yukui Ge¹, Wei Wang¹, Lingsen Zeng², Gen Li³ & Xu Lin⁴

¹ State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

² Institute of Geology, Chinese Geological Academy, Beijing 100037, China;

³ Department of Earth, Planetary and Space Sciences, University of California, Los Angeles CA 90095, USA;

⁴ College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China

* Corresponding author, E-mail: liu-zeng@ies.ac.cn

Tectonic geomorphology is a fast-developing interdisciplinary research field. Different from traditional geomorphology, tectonic geomorphology strongly shifts to quantify the geomorphic processes. The central tenet in tectonic geomorphology is to clarify the interactions among tectonic, climatic, and surface processes, and to provide quantitative descriptions of climate, topography, hydrology, physical and chemical erosion, deposition and rock deformation and their relationships in tectonically active settings.

In this review, we first introduce major scientific questions and central concepts, the techniques and methods commonly used in this field, especially the major game-changing dating techniques (e.g., cosmogenic nuclide dating and low-temperature thermochronology) and remote sensing or surveying methods (e.g., LiDAR). Then we present some case studies in the past three decades showing lines of evidence that the interaction among tectonic, climatic, and surface processes can occur in a wide range of temporal and spatial scales, ranging from hours to million-year in time, and from single fault to orogenic belt in space. We also synthesize important progresses in this field toward a better understanding of the topographic evolution of orogenic belts: (1) Tectonic, climatic and surface processes collaborate to shape the landscape such that tectonic activities alone do not necessarily lead to topographic growth. For instance, when erosion and tectonic accretion are in equilibrium, topographic steady state is reached, with no surface uplifting despite on-going tectonic activity. (2) Sedimentary records in range-front basins, such as the increase of deposition rate, or the occurrence of conglomerates, were often used as proxies of tectonic uplift of mountain ranges in early studies. However, sedimentary sequence should be a collective product of tectonic, climatic, and surface processes. These commonly-used proxies for tectonic activity can also be due to climate changes, instead. (3) Tectonics plays a key and leading role in the coupling of tectonic-climatic-surface process; climatic and surface processes influence but do not drive tectonics. (4) Isostatic response to erosion will lead to the rebound of mountain peaks, but the overall effect of erosion is to lower the mean elevation. Thus, uplift due to isostatic rebound is a secondary component of tectonics. Lastly, we outline in brief a list of outstanding scientific questions remaining to be answered in the field.

tectonic geomorphology, tectonic-climatic and surface processes, landscape evolution, geochronology, remote sensing techniques

doi: 10.1360/N972018-00498