

试论地貌学的新进展和趋势

鹿化煜^{1,2}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘要:地貌变化有内在的规律,对环境保育、资源利用和自然灾害防治有重要影响。作为交叉学科和地理学的重要分支学科,地貌学具有重要理论价值和实际意义。过去10多年来,随着遥感、地理信息技术和沉积物定年、地球物理和地球化学探测以及数值模拟等新技术和新方法的应用,地貌学家的研究视野和深度不断扩大与加深,在构造地貌、气候地貌和人类活动与地貌过程等传统领域有很多新进展,揭示了不同地貌单元的变化规律和机理,极大地推动了地貌学的发展。在新时代,除了继续加强传统地貌单元的深入研究外,地貌学的发展应与全球环境变化和未来地球等重大科学问题(计划)紧密结合;地貌学家要关心人类活动对地貌过程的影响及适应,并利用新技术开展地貌过程的定量重建和数值模拟。同时加强地理学专业学生的地质学基础学习、发展定量地貌学和行星地貌学、系统开展人类活动对地貌过程的影响和适应研究,是提升中国地貌学水平的途径,也可为推动国际地貌学发展做出贡献。

关键词:地貌学进展和趋势;新技术;地貌定量重建和模拟;人类世;地球表层系统科学

1 引言

地貌学是研究地球表层地形和景观特征、分布及其形成和演化的科学,强调空间和时间演化过程,是联系地质学、地理学和气候学等的交叉学科。地表物质的侵蚀、堆积和地壳构造活动是影响地貌发育的重要因素。在新时代,对月球、火星等地貌形态和物质组成的研究,成为地貌学的新内容。可以说,地貌学是揭示地表过程和格局变化的重要科学。地貌过程影响着气候、水循环、生物、土壤等环境要素的分布格局,因此,地貌学是地理学的重要基础和分支,也是地球表层系统科学的重要组成部分。

地表是人类活动最重要的场所,也是与人类联系最直接的地球要素之一。人们的生活和生产活

动在不同的地貌单元上进行,人类生存所依赖的水、土壤、动植物资源甚至于气候和交通条件等,都受到地貌的影响和控制。毫无疑问,全面认识不同时间和空间尺度地貌变化的规律和驱动机制,具有重要的理论和实际意义。

中国地貌类型多样,地表过程复杂,对环境的影响大。加强中国的地貌学研究,不仅可为解决社会经济发展中遇到的资源和环境问题提供科学依据,对于推动国际地貌学学科的进步、发展地球表层系统科学,也有重要意义。本文基于作者在地貌学学习、研究和教学实践中的粗浅认识,结合调研分析最近10多年在《Geomorphology》《地理学报》《科学通报》《地理科学进展》等杂志发表的地貌学相关论文,评述地貌学的最新进展和未来趋势^①。

收稿日期:2018-01-11;修订日期:2018-01-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026, 41690111);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026, No.41690111; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02]。

作者简介:鹿化煜(1968-),男,陕西西安人,教授,主要从事地貌过程、古气候和全球变化研究, E-mail: huayulu@nju.edu.cn。

①由于涉及的文献多,在本文中未一一列出。有兴趣的读者请参考这些学术杂志论文。

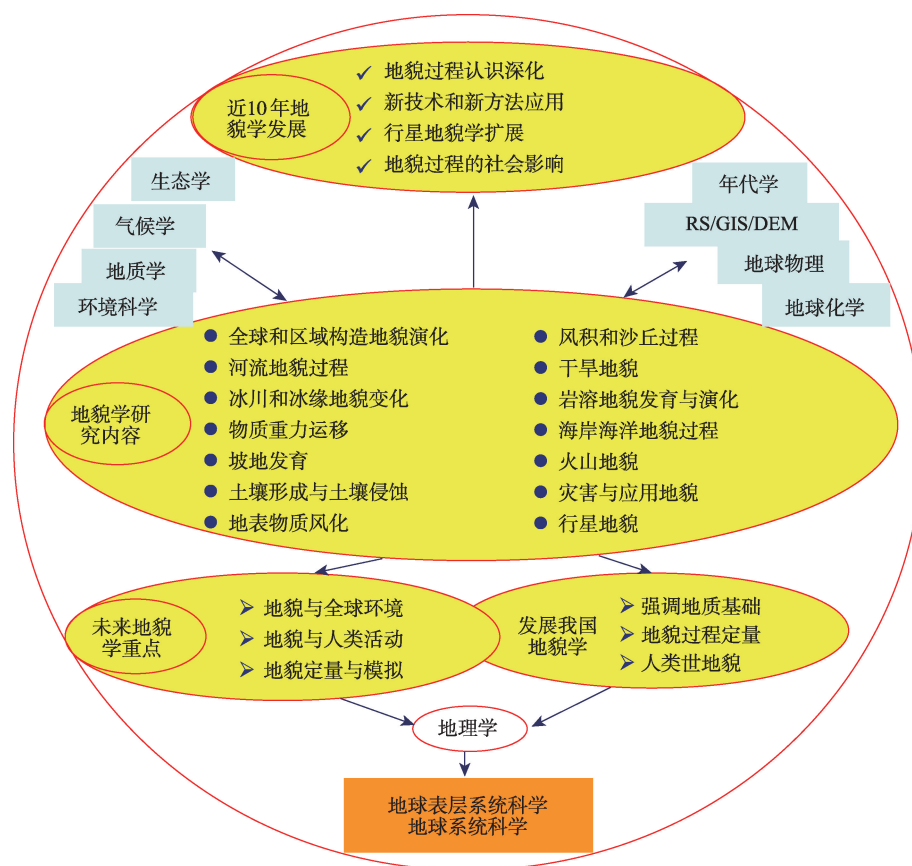
引用格式:鹿化煜. 2018. 试论地貌学的新进展和趋势[J]. 地理科学进展, 37(1): 8-15. [Lu H Y. 2018. Progress in geomorphology and future study: A brief review[J]. Progress in Geography, 37(1): 8-15.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.002

2 地貌学的新进展

2.1 地貌过程

不同类型地貌发育过程的规律和驱动机制,依然是最近10多年来地貌学研究的重要内容。从南半球新西兰火山海岸小冰期的冰碛物组成和分布、到北美洲大平原地区沙丘活化与植被的联系;从青藏高原—喜马拉雅山地地貌发育对大江大河水系结构的控制,到植物根系发育过程对土壤沉积物分层的控制和影响,以及海岸盐沼植物对潮滩沟脊发育的作用和围垦对淤泥质海岸发育的影响等,都是当今地貌学家关心的重要内容,也是当前的热点地貌学问题。全球和区域构造地貌演化、河流地貌过程、冰川和冰缘地貌变化、物质重力运移和坡地发育、地表物质风化和土壤形成与侵蚀、风成沉积过程和沙丘动力过程与干旱地貌、岩溶地貌发育与演化、海岸海洋地貌过程与河口沉积动力、火山地貌、

灾害与应用地貌和行星地貌等,是最近10年地貌学发展最为迅速的领域(程维明等, 2017; 莫多闻等, 2017; 徐志伟等, 2018; 并请参阅 *Geomorphology* 杂志 2017-2018 的论文)(图 1)。国内外地貌学家围绕不同地貌体的形成过程、影响机制和发展过程展开研究(请参阅 *Journal of Geographical Sciences* 2017 第 11 期; 请浏览 9th International Conference on Geomorphology 2017 网站)。地貌学问题跨越不同的时空尺度。在宏观尺度,研究问题包括:新生代欧亚板块强烈挤压控制青藏高原—喜马拉雅生长过程(鹿化煜等, 2013),由于全球气候变暖导致的热带太平洋地区数百公里区域的珊瑚死亡和珊瑚礁白化,或者是海面上升导致的全球海岸区域淹没和海岸带自然灾害加剧、影响数万公里的海岸线(Hughes et al, 2017)等。在微观尺度,研究问题包括:风蚀地区沙砾物质启动的风速阈值(崔梦淳等, 2015)、海岸大米草盐沼植物对潮滩冲沟的影响



黄色区域是地貌学内容及其发展;蓝色区域是相关的学科。

图1 地貌学的研究内容及其与相邻学科的联系和未来发展

The yellow area indicates the geomorphology, the blue area are other disciplines.

Fig.1 Research of geomorphology in the past 10 years, its linkages with other disciplines, and the trend of development

(Wang et al, 2012)等等,甚至于研究动物活动对地表形貌的影响(李华等, 2007),正形成一门新的动物地貌学(Zoogeomorphology)(Butler et al, 2018; Leonardi et al, 2018)。

总结文献发现,在最近10多年,地貌学家围绕地表物质形态、地貌发育过程和驱动机制,对不同尺度地貌单元的形成、发育及它们之间的联系进行了深入研究,深化了我们对地貌过程的认识。相关的地貌学论文也逐年增多,体现出学科的繁荣。以国际地貌学杂志《Geomorphology》为例,2007年以来每年发表的论文数达到300余篇。

2.2 新技术和新方法应用

新技术和新方法的应用有力地推动了地貌学发展,深刻地揭示了地表物质运动规律和影响因素。主要体现在3个方面:①遥感技术(RS)、地理信息科学(包括地理信息系统(GIS)和数字高程模型(DEM)等);②年代学、地球化学与地球物理探测和示踪;③数值模型和计算技术。其中,遥感技术极大地扩大了地貌学家的视野范围,并能揭示地表物质运动的全过程。比如,通过遥感监测可以揭示强沙尘暴在中亚地区的起源、沿中高纬地区随着西风环流向东扩散、达到太平洋和北美洲甚至于格陵兰冰盖地区,为认识粉尘的长距离扩散和环境影响提供了直接证据(Uno et al, 2009; Lu W Y, 2017)。同样,长江、湄公河、尼罗河和密西西比河等大江大河携带的物质的搬运过程、在河口区的扩散和分布等,可从遥感影像直接观察到(Chen et al, 2007; Lee et al, 2018)。在侵蚀性淤泥质海岸潮汐叉道的形成和发育速度以及干旱沙漠中大型沙丘的移动速率(Xu et al, 2017; 黄晓力等, 2017)等方面,这些以前靠人工测量才能获得的数据,在高分辨率不同时序的遥感影像图上得到了很好的体现。可以说,遥感影像分析带来了地貌过程研究的一场革命,使我们以全新的视角和全域的空间尺度认识短时间尺度的地貌过程和地表物质迁移。同时,基于遥感技术和地理信息大数据分析,可揭示不同时间和空间尺度地貌单元间的相互作用和演化过程,成为现代地貌学分析的有力工具。另外,地貌过程的数值模拟和计算技术发展迅速,从黄土堆积侵蚀过程的数字高程模型预估到数值模拟(汤国安, 2014),以及河口三角洲增长过程极限模拟(Gao, 2007)等,从多个角度揭示地貌过程和趋向。应用上述技术,更加准确地揭

示了地貌的发育过程,并为预测模拟服务。

揭示地貌演化的过程和规律,需要独立的时间标定。近10多年来,在十年一百年时间尺度的 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 定年,到千年一万年时间尺度的放射性 ^{14}C 、光释光,以及万年一百万年构造时间尺度宇成核素定年(如 ^{10}Be - ^{26}Al 埋藏年龄、Ar-Ar、锆石U-Pb)等定年技术的快速发展,加上传统的古生物地层、土壤地层和磁性地层等方法,使得我们可揭示不同时间尺度的地貌演化过程。最近发表的大量地貌演化方面的论文,很多都得益于这些定年技术的进步。

2.3 地貌学研究领域扩展

在对地球表层不同地貌体和地貌过程认识的基础上,随着遥感和空间探测技术的发展,揭示行星地表地貌过程,是最近10年强劲发展的领域。西方国家对于月球地貌的探索可追溯到20世纪60-70年代,并发展到现代的火星地貌研究(Grotzinger et al, 2015; Black et al, 2017)。中国行星地貌学研究起步较晚,但在最近10多年来发展迅速,在完成了绕月和登陆月球工程后,获得了全月地貌地形图,揭示了月球地貌特征(王娇等, 2015; 周成虎, 2015)。中国探月计划的首要科学问题就是获取月球表面三维立体影像,精细划分月球表面的基本构造和地貌单元,进行月球表面撞击坑形态、大小、分布、密度等的研究,为类地行星表面年龄划分和早期演化历史研究提供基本数据,并为月面软着陆区选址和月球基地位置优选提供基础资料(Zhang et al, 2016)。这些恰恰是地貌学研究最基本的内容。同时,中国行星探测计划正在积极推进之中,行星地貌过程必将是未来地貌学家研究的主要内容之一。尤其是在中国行星地貌学家人数相对不多的情况下,开展行星地貌学的研究,具有不可替代的重要意义。

2.4 地貌过程对社会的影响

地貌学与人类活动和行为具有不可分割的相关性(Lu H Y et al, 2017)。滑坡、泥石流和沙尘暴等地表过程灾害对社会的影响已是不言而喻,尤其是在山地和干旱地区,已受到国际社会多方面的重视(崔鹏, 2014)。虽然已经意识到人类活动对地貌过程的深刻影响,但是相关的研究成果还较少。比如,英国诸多城市及其邻区人类活动对地表物质迁移速率和数量的影响,已经超过自然过程的数倍甚至于数十倍,但是,这些物质输移对环境的影响极

其效应还没有得到精确的评估。在中国,高速城市化进程正在全面改变着地貌形态,这些地表变化如何影响城市环境、地表物质迁移是否有序和可持续,也需要评价。特别是地铁、地下商城、地下排水设施的大量建设,如何像地面上的规划有序、布局合理,并且减少对区域环境的影响,需要全面研究。随着地下场所的全面建设,绘制地下地貌图和地图,可能是未来地貌学与地图学交叉研究的重要内容之一。随着人类上天、入地活动的深入发展,地貌学家把眼光投向外空和地下已势在必行。

此外,地貌格局可能影响到全球尺度的环境污染评价和管理。在全球海岸地区的污染物排放中,不同洋流背景下污染物的输移和保存有较大的区别(Tessler et al, 2015)。同样,随着沉积物的输移和沉积,污染物质(如微塑料)的分布和富集与地貌动力过程联系密切,成为揭示污染物迁移、埋藏和释放的新研究方向。

3 地貌学的发展趋势

从以上的分析可以看出,对地貌单元进行全面深入的研究,需要重视并结合遥感和地理信息技术、沉积物定年技术,以及对地貌过程的地球物理探测与地球化学示踪、地貌过程的数值模拟和预估等。同时,也应该看到,地貌学家只有把眼光投向关系人类生存发展的重大环境、资源以及灾害等问

题,发挥地貌学研究的独特优势,才能提高地貌学的学科竞争力,使其真正成为地球系统科学基础的、重要的和前沿的学科方向,从而发展新时代的地貌学。基于这样的原因,地貌学家不仅要开展传统的地貌学问题研究,更要进行学科交叉,服务于国家战略,扩大大地貌学的影响。

3.1 地貌过程与全球环境

全球气候和环境变化是地球系统科学的前沿和重要科学问题之一。在未来地球(Future Earth)计划中,动态的星球(内容包括观测、解释和预测地球、环境和社会系统的变化趋势、驱动机制及相互作用)是3个重要议题之一。作为地球表层重要的要素,地貌过程在全球环境变化中起着重要的作用,有时甚至是决定性作用。比如,我们正在承担的美国科学基金会项目(NSF-PIRE)和国家重点研发计划项目(2016YFE010950),探索的科学问题就是亚洲的地貌变化如何影响全球气候。亚洲地貌发育与全球变化联系的可能机制为:亚洲南部青藏高原—喜马拉雅地貌抬升—高原和山地周边大量的物质不断堆积、以及亚洲中部干旱加剧—粉尘释放增多—太平洋高纬中部“铁肥效应”增强—海洋生物(特别是浮游生物)繁盛—吸收和消耗更多的大气 CO_2 (draw down CO_2)—全球气候变冷(图2)(Jickells et al, 2005; Garziona et al, 2015)。当然,这一假说是否成立,还需要更多的研究和事实检验。但可以确信,地貌过程在全球变化中发挥着重要作用,它可能是

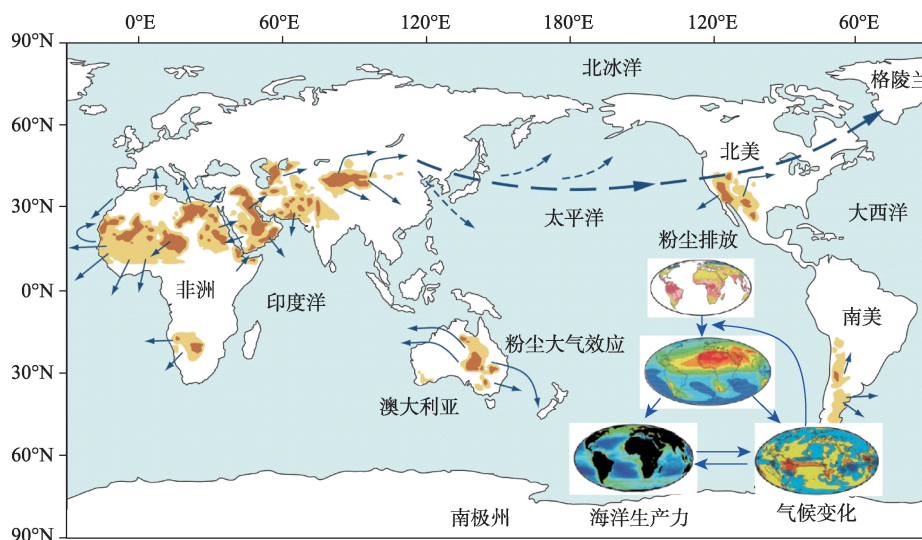


图2 亚洲和全球的粉尘循环过程及其在地球环境变化中作用(改自 Jickells et al, 2005; Garziona et al, 2015)

Fig.2 Dust circulation process in the Earth system and its effect on global environmental change

(Modified after Jickells et al, 2005; Garziona et al, 2015)

全球环境演化的“起搏器”;也可能是全球变化的响应者,并对全球环境变化有反馈作用。在未来地球和全球变化中,地貌学家肯定能够发挥重要作用。

3.2 地貌过程与人类活动和人类世

人类活动已成为地貌过程的重要应力,人类世(Anthropocene)已成为独立于已有地史单元的新成员。在这一新时代背景下,人类活动已经与大气环流、生物作用、岩石圈风化和水文循环等,成为影响地表过程的重要因素。人类圈的概念也相应诞生(图3)。作为揭示地表物质形态变化过程的地貌学,考虑人类活动的影响、揭示人类活动在地貌过程中的作用,必然是重要的研究内容。从最近10多年、尤其是近几年发表的地貌学相关的论文来看,有关人类因素的论文越来越多。这反映了地貌学研究的新趋势。

3.3 地貌过程的量化与模拟

作为自然科学的地貌学,与地质学、气候学、生态学、环境科学等学科有着密切的联系。地貌过程与地球要素的联系在不同的时间和空间尺度上存在差异。为了更好地揭示地貌过程的规律和机制,及其与其他要素的联系和相互作用,需要加强地貌过程的定量研究。比如,我们要揭示全球沙漠形成和演化的规律,就必须对各个沙漠的形成时代、气候背景和生态要素等有准确的认识和定量表达。这样,可在时间和空间上进行对比分析,找出其间的联系和异同。另外,作为复杂的地貌系统,简单

的描述和分析,难以揭示地貌过程的真实面目、内在的动力过程和要素间复杂的响应与反馈机制;建立相应的数值模型,是最终认识地貌演化规律、影响因素和预测未来趋势的必由之路。因此,地貌过程的量化重建和数值模拟,是未来研究中必须加强的方向。

4 新时代中国地貌学的发展

纵观10多年来中国地貌学发展,可以看出,中国科学家在地貌过程及驱动机制和环境、资源效应等方面取得了很多重要的成果。比如,在新生代青藏高原—喜马拉雅的形成演化及其效应、沙漠—戈壁的起源演化与环境效应、河流地貌、海岸地貌、冰川—冰缘地貌、丹霞地貌、山地过程与灾害、地貌工程等领域,发表了大量高水平的论文、解决了实际生产中的诸多问题。同时,也应看到,中国地貌学研究的系统性和深入程度还有待提高,尤其是在培养人才方面,以前的一些做法也需要改进,以迎接新时代地貌学发展的挑战。

4.1 强调地质基础的地貌学家培养

从近10年来的《地理学报》《地理科学进展》《科学通报》和《中国科学》等学术刊物可以看出,不少地貌学相关论文的地质学基础较为薄弱,诸多地貌学论文对基础地质数据和地质过程的理解表面化。因此,有些论文对于地貌学问题的理解和分析是片面的甚至于出现错误。一方面,在大学的地理教育中,需要强化《普通地质学》《构造地质学》和《沉积学》等基础地质学的教育和训练,加强地貌专业学生的地质学基础;另一方面,具有地理背景的地貌学家要加强相关地质要素研究,多从地质过程的角度考虑地貌学的问题,以减少对地貌过程片面理解或者曲解。

4.2 地貌过程的定量表达与模拟

中国地貌学研究中从事数据采集、实验和过程分析的人员相对多,从事数值模拟的人员少。因而,定性描述的传统地貌过程研究论文多,定量分析地貌动力和演化过程的论文少。在未来的地貌学研究中,对于典型地貌过程的定量表达与模拟是必然的趋势之一,需要加强相关人员的培养和支持。同时,部分从事地貌模拟的年轻人员过于相信模型输出的结果,弱化了地貌过程的实际考察和实

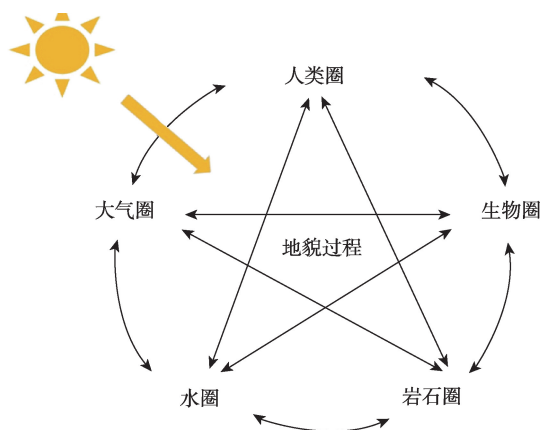


图3 地貌过程在人类世中的作用:地貌过程受到自然环境变化和人类活动的综合影响(改自Ellis, 2017)

Fig.3 Geomorphology and the Anthropocene: Linking the geomorphological processes, environmental change, and human activities (Modified after Ellis, 2017)

验证,以至于一个“看上去不错”的模型输出结果,但与实际地貌过程相去甚远,甚至是错误的。这些问题在一些年轻地貌学家的论文和报告中已经显现。作为未来优秀的地貌学研究,必须做到数值模拟结果和实际定量分析的统一。

4.3 密集人类活动影响下的地貌过程

随着人类世(Anthropocene)的到来,人类活动作为一种地貌应力,深刻地改变着地貌过程。在这种背景下,加强人类活动对地貌过程的影响研究,指导人类活动对地貌灾害的适应,是地貌学家义不容辞的责任(Lu H Y et al, 2017)。在中国相关人类世地貌过程的研究已经开展,比如三峡大坝建设对流域及河口、海岸地貌过程的影响(Chen et al, 2007),沿海围垦工程的资源和环境效应,城市化过程中的水文效应(Du et al, 2012)和地面沉降、地裂缝等问题,表明中国地貌学家在认识人类世及其影响方面的积极态度。中国是一个人口大国,尤其是东部和中部人口密度大、人类活动影响地貌过程的强度高、速率快、范围广,甚至可以说,人类活动已经影响到地貌过程的各个环节。这些地貌过程的变化会带来何种资源、环境和灾害问题,是地貌学家需要特别关注的内容。

5 小结

最近10多年来,国内外在传统的地貌学领域,向过程分析、量化重建和机理理解不断前进,加强了遥感和地理信息技术、年代学、地球物理和地球化学以及数值模拟等技术的应用,对地貌过程的认识不断深入。同时,应该认识到,未来将地貌过程与全球环境变化、人类世资源和灾害问题、数值模拟与预估等结合,才能解决地貌学中的复杂问题,提高地貌学学科竞争力,为发展地球表层系统科学和国家经济建设服务。加强地质学基础教育和培训、重视地貌过程定量表达和分析、重视人类活动对地貌过程的影响,是提升中国地貌学水平的重要途径。

致谢:感谢傅伯杰院士、赵文武教授的组织、约稿和修改。感谢王晓勇副教授、研究生吕娜娜、常茜在论文插图、文献核对等方面的帮助。感谢王晓勇副教授、王先彦教授和徐志伟博士阅读原文并提出宝贵的修改意见。感谢审稿人提出的宝贵修改意见。

参考文献(References)

- 程维明,周成虎,申元村,等. 2017. 中国近40年来地貌学研究的回顾与展望[J]. 地理学报, 72(5): 755-775. [Cheng W M, Zhou C H, Shen Y C, et al. 2017. Retrospect and perspective of geomorphology researches in China over the past 40 years[J]. Acta Geographica Sinica, 72(5): 755-775.]
- 崔梦淳,鹿化煜, Sweeney M, 等. 2015. 便携式粉尘观测仪测定腾格里沙漠和毛乌素沙地PM10释放通量[J]. 科学通报, 60(17): 1621-1630. [Cui M C, Lu H Y, Sweeney M, et al. 2015. PM10 emission flux in the Tengger Desert and Mu Us Sand field, northern China, measured by PI-SWRL[J]. Chinese Science Bulletin, 60(17): 1621-1630.]
- 崔鹏. 2014. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展, 33(2): 145-152. [Cui P. 2014. Progress and prospects in research on mountain hazards in China[J]. Progress in Geography, 33(2): 145-152.]
- 黄晓力,丁沛,那嘉明,等. 2017. 地貌发育演化研究的空代时理论与方法[J]. 地理学报, 72(1): 94-104. [Huang X L, Ding H, Na J M, et al. 2017. Theories and methods of space-for-time substitution in geomorphology[J]. Acta Geographica Sinica, 72(1): 94-104.]
- 李华,杨世伦. 2007. 潮间带盐沼植物对海岸沉积动力过程影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 22(6): 583-591. [Li H, Yang S L. 2007. A review of influences of saltmarsh vegetation on physical processes in intertidal wetlands[J]. Advance in Earth Science, 22(6): 583-591.]
- 鹿化煜,郭正堂. 2013. 晚新生代东亚气候变化: 进展与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 43(12): 1907-1918. [Lu H Y, Guo Z T. 2014. Evolution of the monsoon and dry climate in East Asia during late Cenozoic: A review[J]. Science China: Earth Sciences, 57(1): 70-79.]
- 莫多闻,周力平,刘耕年,等. 2017. 北京大学地貌第四纪学科的创建与发展[J]. 地理学报, 72(11): 1974-1996. [Mo D W, Zhou L P, Liu G N, et al. 2017. Establishment and development of geomorphology and Quaternary sciences at Peking University[J]. Acta Geographica Sinica, 72(11): 1974-1996.]
- 汤国安. 2014. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 69(9): 1305-1325. [Tang G A. 2014. Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J]. Acta Geographica Sinica, 69(9): 1305-1325.]
- 王娇,程维明,周成虎. 2015. 全月球撞击坑识别、分类及空间分布[J]. 地理科学进展, 34(3): 330-339. [Wang J,

- Cheng W M, Zhou C H. 2015. A global inventory of lunar craters: Identification, classification, and distribution[J]. *Progress in Geography*, 34(3): 330-339.]
- 徐志伟, 鹿化煜. 2018. 自然地理学发展迎来新时代: 从“2017年全国自然地理学大会”看自然地理学新发展与新挑战[J]. *地理学报*, 73(1): 192-196(待刊). [Xu Z W, Lu H Y. 2018. Ziran dilixue fazhan yinglai xin shidai: Cong "2017 nian quanguo ziran dilixue dahui" kan ziran dilixue xin fazhan yu xin tiaozhan[J]. *Acta Geographica Sinica*, 73(1): 192-196 (in press).]
- 周成虎. 2015. 全空间地理信息系统展望[J]. *地理科学进展*, 34(2): 129-131. [Zhou C H. 2015. Prospects on pan-spatial information system[J]. *Progress in Geography*, 34(2): 129-131.]
- Black B A, Perron J T, Hemingway D, et al. 2017. Global drainage patterns and the origins of topographic relief on Earth, Mars, and Titan[J]. *Science*, 356(6339): 727-731.
- Butler D R. 2018. Zoogeomorphology in the Anthropocene[J]. *Geomorphology*, 303: 146-154.
- Chen Z Y, Gupta A, Yin H F. 2007. Monsoon rivers of Asia[J]. *Geomorphology*, 85(3-4): 129-130.
- Du J K, Qian L, Rui H Y, et al. 2012. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 464-465: 127-139.
- Ellis E C. 2017. Physical geography in the Anthropocene[J]. *Progress in Physical Geography*, 41(5): 525-532.
- Gao S. 2007. Modeling the growth limit of the Changjiang Delta[J]. *Geomorphology*, 85(3-4): 225-236.
- Garzione C, Tarduno J. 2015. PIRE: Dust stimulated draw-down of atmospheric CO₂ as a trigger for Northern Hemisphere Glaciation[R]. Alexandria, Virginia: National Science Foundation.
- Grotzinger J P, Gupta S, Malin M C, et al. 2015. Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, Gale crater, Mars[J]. *Science*, 350(6257): aac7575.
- Hughes T P, Barnes M L, Bellwood D R, et al. 2017. Coral reefs in the Anthropocene[J]. *Nature*, 546(7656): 82-90.
- Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate[J]. *Science*, 308(5718): 67-71, doi: 10.1126/science.1105959.
- Lee C F, Huang W K, Chang Y L, et al. 2018. Regional landslide susceptibility assessment using multi-stage remote sensing data along the coastal range highway in northeastern Taiwan[J]. *Geomorphology*, 300: 113-127.
- Leonardi N, Carnacina I, Donatelli C, et al. 2018. Dynamic interactions between coastal storms and salt marshes: A review[J]. *Geomorphology*, 301: 92-107.
- Lu H Y, Zhuo H X, Zhang W C, et al. 2017. Earth surface processes and their effects on human behavior in monsoonal China during the Pleistocene-Holocene epochs[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 27(11): 1311-1324.
- Lu W Y, Zhao W C, Balsam W, et al. 2017. Iron mineralogy and speciation in clay-sized fractions of Chinese desert sediments[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(24): 13458-13471, doi: 10.1002/2017JD027733.
- Tessler Z D, Vörösmarty C J, Grossberg M, et al. 2015. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world[J]. *Science*, 349(6248): 638-643.
- Uno I, Eguchi K, Yumimoto K, et al. 2009. Asian dust transported one full circuit around the globe[J]. *Nature Geoscience*, 2(8): 557-560.
- Wang Y P, Gao S, Jia J J, et al. 2012. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China[J]. *Marine Geology*, 291-294: 147-161.
- Xu Z W, Mason J A, Lu H Y, et al. 2017. Crescentic dune migration and stabilization: Implications for interpreting paleo-dune deposits as paleoenvironmental records[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 27(11): 1341-1358.
- Zhang X Y, Ouyang Z Y, Zhang X M, et al. 2016. Study of the continuum removal method for the Moon Mineralogy Mapper (M-3) and its application to Mare Humorum and Mare Nubium[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 16(7): 133-142.

Progress in geomorphology and future study:

A brief review

LU Huayu^{1,2}

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The formation and evolution of landform and landscape on Earth follow unique rules with specific forcing mechanisms. Earth surface processes have affected human environment, resource exploitation, and natural hazards and disasters. As an important branch of geography, geomorphology is an interdisciplinary field with important theoretical and practical values. With the application of remote sensing, geographical information system, digital elevation models, and sediment dating techniques, detection and tracing techniques of geophysics and geochemistry, and numerical simulation, the scope of geomorphology has been expanded and deepened over the past 10 years. Study on geomorphological process modulated by tectonic movement, climatic changes, gravity forcing, and human activities has greatly moved forward. New geomorphological processes and forcing mechanisms have been unraveled, and these recent achievements have significantly improved our understanding of Earth surface processes. In this new era of research, in addition to strengthening the study in traditional areas such as investigating different geomorphological processes at various temporal and spatial scales, bridging geomorphological research with global environment change and Future Earth programs is recommended. In particular, geomorphologists should pay much more attention to human activities, which is a vital agent that modulates Earth surface in the Anthropocene. Quantitatively reconstructing and modeling geomorphological processes are also an important area to explore. In China, to train geography students with more extensive and in-depth geological knowledge and practices, develop quantitative geomorphology and planetary geomorphology, and strengthen research on human impact on landform and topography will improve the quality of research, and promote geomorphology as a key discipline in Earth system science.

Key words: progress in geomorphology; new detection and tracing technologies; quantitative reconstruction and numerical simulation; Anthropocene; earth surface system science