

序 一

构造地貌学是构造地质学和地貌学相互交叉的重要分支学科，正日益受到广泛关注。构造地貌学不仅研究地球表面的形态和特征，还探讨这些表面形态如何受到地质构造过程的影响。近年来，得益于先进的测年技术与观测手段和数值模拟方法的不断进步，构造地貌学的研究也得到了快速发展，这为我们理解地球表面过程及其深部动力学过程提供了崭新视角，也促成了《构造地貌学》这本书的诞生。该书最初由 Doug Burbank 和 Bob Anderson 教授于 2001 年共同撰写并完成出版，随后于 2012 年修订再版，发行了第二版。这本书在地球科学研究中产生了广泛的学术影响力，极大地推动了国际构造地貌学的发展。然而，相较于国际上构造地貌学的成熟发展，我国构造地貌学的发展总体上起步较晚、基础较弱，在最近十多年才取得了较大的进步。为进一步推动和完善构造地貌学在我国的发展，天津大学刘静教授组织专家团队完成了该书的中文翻译工作，为广大读者提供了宝贵的学习资源。

《构造地貌学》这本书主要围绕建造地形的构造过程与破坏地形的地表过程两大地貌演化过程之间的竞争关系展开深入探讨。通过对这两大过程的深入剖析，揭示出它们在地貌形成和演变中的相互作用与互馈机制。全书共分为 11 章。第 1 章构造地貌学概论作为该书的总起章节，概述了该书的逻辑框架并对部分研究争论进行了简述。第 2 章地貌标志详细讨论了如何从面状地貌、线状地貌等地貌标志识别构造变形的原理、方法及在应用时应注意的问题，这对于重建区域构造演化具有重要意义。为了确定构造变形发生的时间，测年工作就成了必备步骤之一。因此，该书在第 3 章地貌年代测定方法中详细阐述了多种相对定年和绝对定年方法的原理及其在实地研究中的应用。这些测年研究方法的时间尺度从几十年跨越至数百万年，为研究不同时间尺度的构造地貌演化提供了有力工具。第 4 章从岩石力学的角度论述了断层和褶皱产生的变形原理以及不同断层和褶皱的变形扩展和地貌表现。第 5 章大地测量学重点介绍了短周期变形研究中所使用的传统简便的近场观测技术和先进复杂的远场测量方法及其实际应用。测量技术的进步引领了高精度大地测量的新时代，为年至十年时间尺度上的变形分配提供了一个更清晰的视角。第 6 章从古地震的视角论述了地震破裂和滑动速率，包括古地震的直接观测手段、间接观测证据和断裂行为。第 7 章则以定量研究侵蚀和抬升速率为核心论述对象，这也是构造地貌学的核心内容。目前构造地貌学争论主要围绕是气候还是构造控制着侵蚀速率或地形的变化，尽管已有假设提出气候和构造之间可能具有潜在的互馈作用，但是目前还缺乏足够的证据支持。该章节主要介绍了不同时间尺度的侵蚀速率量化方法和不同情形下约束抬升速率的实例。第 8 章从全新世时间尺度论述了构造变形和河流地貌景观对不同构造变形的响应。由于全新世保存的地质记录较好，其比地质历史时期的任何一个阶段都更有利于揭示地质过程之间的相互作用、因果关系以及正负反馈耦合等，因此为构造地貌学家研究各种地貌体系的运行规律和相互作用提供了极好的条件。第 9 章和第 10 章分别从中等时间尺度（全新世至更新世）和百万年时间尺度论述了不同构造变形及其地貌响应，并列举了大量研究实例进行详细解释，包括海岸阶地、河流、山脉、盆地和冰川等。最后一章重点介绍了多种时空尺度的各种建模技术及其在构造地貌研究中的应用。这些模型包括陡坎退化模拟、河流侵蚀模拟、山脉尺度模拟、造山带尺度模拟、大气和冰川作用及热

动力学模拟等，并被应用于科罗拉多高原、南阿尔卑斯山和青藏高原等多个研究区。这些数学模型极大地深化了我们对地球如何变形以及地貌如何响应的科学认知。

这本书的研究内容非常丰富，包括了古地震学、大地测量学、岩石力学、构造地质学、地貌学、地质年代学和数值模拟等多学科交叉内容，系统阐述了构造地貌学的基础理论、相关技术和方法以及在不同时间尺度的应用。该书是研习构造地貌学的宝贵资源，能够为相关领域的学者、研究人员和学生提供有价值的参考资料，希望这本书能够激发更多读者的研究兴趣，共同促进构造地貌学科的学术交流和深入探讨。

张培震

中国科学院院士

中山大学地球科学与工程学院教授

中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会主任

2024年12月26日

序 二

近几十年来，构造地质学与地貌学的紧密结合催生了构造地貌学这一新兴的跨学科领域。该领域以其学科交叉和数值量化的特点，特别是有关晚近时期地球跨圈层过程的研究，引起了地球科学家的广泛关注。近年来，随着新的观测技术和数值模拟方法的进步，传统地质学和地貌学研究中野外工作的局限和研究领域间的壁垒逐渐得到突破，为构造地质学和地貌学的发展注入了新活力，为揭开地球科学的奥秘提供了新视角，也为地球科学研究提供了一种新的范式。可以说，至少自 21 世纪以来，我国的构造地貌学经历了飞跃式的发展，目前已成为地球科学研究中一个先进的、活跃的、富有生机与前途的分支学科和研究领域。

该书是一本学习构造地貌学的优质资源，它系统总结了全球构造地貌学研究的最新方法、技术、成果、案例、挑战和争议。书中涉及的研究区域包括北美的科罗拉多高原、南美的安第斯山脉、南极洲、大洋洲、青藏高原以及阿尔卑斯山脉等多个研究热点地区。其中，青藏高原是目前仍在生长的高原，是我国乃至世界地球科学家们的研究主体，对青藏高原高原构造地貌学的研究将毫无疑问地有助于我们更深入地理解地球动力过程、气候演变和地表响应之间的相互作用。该书不仅对初学者极具价值，也能为有经验的科研人员开阔新的研究思路。天津大学刘静教授及其专家团队历经数年，完成了这部重要著作的中文翻译工作，为大地学工作者提供了宝贵的学习和参考资料，对发展我国的构造地貌研究具有十分重要的意义。

《构造地貌学》这部学术著作的一个核心内容，是深入探讨了地形塑造过程中构造作用与地表侵蚀之间的相互作用与耦合。该书以深入浅出的方式介绍了构造地貌学的基础理论、研究方法和观测技术，并辅以丰富的研究实例，清晰地展示了这两个关键过程在地貌演化中的相互作用和正负反馈。开篇第 1 章提纲挈领地概述了整本书的内容架构。第 2 至 4 章详细阐述了构造地貌学的基础理论和研究方法，包括地貌标志的识别、地貌年代的测定方法以及断层和褶皱的变形机制和力学原理等。这些基础理论的详细介绍为后续的研究介绍奠定了基础，对初学者尤为重要。随后，该书从不同时间尺度探讨了构造变形与地貌响应的关系。第 5 章从大地测量学的角度介绍了短周期变形的观测方法；第 6 章则聚焦于百年至千年时间尺度的古地震研究；第 7 章作为该书的核心，探讨了气候与构造对侵蚀速率或地形变化的控制作用，这是目前仍在争议中的研究课题之一。尽管该书并未完全解答这一问题，但对这一话题的系统探讨无疑能激发读者的思考和灵感。第 8 章和第 9 章分别从全新世、中等时间尺度和百万年时间尺度详细讨论了构造变形和地貌响应。最后一章重点介绍了数值模拟技术的发展历程和不同应用。数学和地学的相互结合为我们定量理解构造地貌演化提供了更加清晰的视角。然而，这一研究方向目前仍然是我国构造地貌学研究最为薄弱的一环。希望该书的出版能够呼吁更多感兴趣的同行们加深对该领域的探索，更希望能吸引更多的新鲜血液，补强定量化和模型化研究力量。

总体而言，《构造地貌学》一书展现了丰富的研究内容，深度融合了多学科知识体系，

实现了跨学科领域的交叉融合，构建了层次分明的构造地貌学知识脉络。期待该书的出版能够激发更多探索性的思维火花，激发学界的研究热情，并汇聚各方力量，共同推动构造地貌学学科的长足发展。



北京大学地球与空间科学学院教授
中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会副主任

2024年12月31日

译 著 前 言

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的地貌学，强调对地貌过程的定量描述，其核心科学问题是理解构造-气候-地表过程相互作用如何塑造地形地貌；聚焦于以量化的方式具体阐述构造活跃的造山带地区的气候、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。它不仅揭示了地球内部动力作用如何塑造地表的壮丽山川，还为理解地球表面形态演化历程提供了关键线索。

构造地貌学还是一门富有挑战的学科。它融合了地质学、地貌学、构造地质学、地理学、地球物理学等多学科的理论与方法，要求研究者具备跨学科的知识背景和综合分析能力。从地壳运动的宏观尺度，到岩石变形的微观机制；从古老山脉的隆起与剥蚀，到现代河流的侵蚀与沉积，构造地貌学的研究对象跨越了时间和空间的巨大范围。也正是这种复杂性，赋予了它无尽的魅力。

本书原著由美国科学院院士 Douglas Burbank 教授和 Robert Anderson 教授合著，两位是国际构造地貌研究领域的引领者。Burbank 教授专注于碰撞山脉带的山脉生长和地貌演变，通过野外考察、高精度测年和数值模拟等手段，系统揭示造山运动-侵蚀-气候-沉积的跨时空耦合机制，为造山带形成与演化提供深刻见解。Anderson 教授则在地貌形成过程方面贡献卓越，擅长利用宇宙放射性核素定年和数字模型，揭示地貌演变的复杂性及其与气候变化和构造活动的关系。两位杰出科学家的研究成果极大地推动了构造地貌学的发展，为相关领域科研人员提供了宝贵的参考和启示。原著第一版于 2001 年出版后大受欢迎，于 2012 年发行第二版，至今在国际构造地貌学研究中产生着广泛的影响。因此，我们将这本经典的《构造地貌学》译介给中文读者。

全书共 11 章，首章概述本书内容架构。第 2 章至第 6 章聚焦基础理论与方法，涵盖地貌标志识别、年代测定、岩石力学变形原理、大地测量技术及古地震研究，构建从观测到分析的完整方法论体系。第 7 章重点探讨侵蚀和抬升速率的定量研究与“构造-气候-侵蚀”的互馈关系。第 8 章至第 10 章分述全新世、中更新世至百万年尺度的构造变形与地貌响应，揭示构造与地表过程的耦合机制。最后，第 11 章整合多尺度建模技术，结合全球构造地貌演化典型与热点区域研究，深化对地球变形与地貌演化的系统性认知。

在翻译原著的过程中，我们深感责任重大。原著以其严谨的学术态度、丰富的案例分析和前沿的研究成果，为读者呈现了一个全面而深入的构造地貌学世界。为了尽可能地保留原著的精髓，我们力求做到准确、流畅、忠于原文。在翻译过程中，我们仔细斟酌每一个术语的表达，反复推敲每一个句子的逻辑，努力让中文读者能够无障碍地理解原著的内涵。同时，我们也意识到，构造地貌学是一个不断发展和进步的学科，新的研究方法和理论不断涌现。因此，我们在翻译过程中也注重对最新研究成果的引入和解读，希望能够为读者提供一个与时俱进的学术视野。

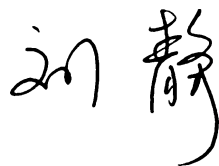
在翻译过程中，我们也遇到了困难和挑战。构造地貌学的专业术语繁多且复杂，有些术语在中文中没有完全对应的词汇。为了克服这一困难，我们查阅了专业的文献和资料，并与同行专家进行交流讨论，力求找到最贴切的词句。此外，原著中的许多案例和数据都是基于

国外的地质背景和研究对象，如何将这些内容与中国的地质实际相结合，也是我们在翻译过程中需要考虑的问题。我们尝试在本书中加入一些与中国地质背景相关的注释和说明，希望能够帮助读者更好地理解和应用书中的知识。

本书的翻译和校对工作历时两年，由团队协作完成。全书翻译工作由韩龙飞、姚文倩、邵延秀、李云帅、王恒、王鹏、王伟、刘静、张金玉、林旭、葛玉魁分章执笔，由刘小利、胡贵明、曾宪阳、王文鑫、刘志军、沈续文、秦可心、王子君、邢宇堃协同参与译校。最终由沈续文负责统稿和校对，确保翻译内容的学术准确性和文本连贯性。为了保证翻译质量，每一章在翻译完成后都经过不同人员的三次独立校对，力求文字通俗易懂，便于读者理解和掌握书中的专业知识，并为国内学者提供国际视野与本土表达。

翻译工作得到了许多人的帮助和支持。在此，我们要特别感谢中山大学张培震院士和北京大学张进江教授，他们在百忙之中抽出时间，以严谨的学术态度和深厚的专业素养，为这本书撰写序言。同时，我们还要感谢科学出版社的编辑，为本书的出版提供了有力的保障。

最后，我们希望这本书能够为中文读者打开一扇通往构造地貌学世界的大门。无论是地质学、地理学、地质工程等专业的学生，还是对地球科学感兴趣的普通读者，我们相信这本书都能提供丰富的知识和深刻的启示。我们期待着与读者一起，在构造地貌学的探索之路上，共同前行。



2026年3月18日

第二版前言

在过去十年中，构造地貌学各个领域的研究呈现爆发式增长。新方法的蓬勃发展和创新成果的不断涌现，为理解构造活动与地表过程的相互作用提供了全新的视角。这促使我们对2001年出版的著作进行了全面修订，最终诞生了第二版作品。

过去十年，几个关键技术的发展共同推动了构造地貌学的进步。首先，高分辨率数字地形数据的广泛可用性（如美国国家航空航天局持续改进并公开的数据集）使全球地貌的定量分析和对比研究成为可能。其次，Google Earth等平台提供的全球影像使研究者能够远程分析偏远地区的地貌特征。再者，激光雷达等技术提供的米级精度地形数据不仅具有前所未有的空间分辨率，还能穿透覆盖的植被，揭示真实的地表形态。我们预计，地面激光扫描技术有望实现厘米级精度的常规测量，而Google Earth可能将实现对河流、冰川及滑坡等地貌特征的米级精度测量。

地形定量分析的进步与地球变形认知的深化相辅相成。一方面，InSAR技术已发展成熟，而自2000年以来，连续GPS观测站的数量更是增长了十倍。如今，在中国台湾、美国西部等构造活跃区，密集布设的大地测量阵列可实现毫米级精度的亚年度监测。另一方面，高密度地震台网的建设使我们能够更精确地重建地震破裂过程、断层几何特征及孕震构造。

新一代对地球、海洋和大气层进行空基观测的方法，不仅提供了更全面的地球视角，还增强了定量对比的能力。目前，卫星已能实现中低纬度地区降水量的高分辨率监测（年际至日尺度）。海底地形与海面高度的测量精度也达到了前所未有的水平。这些数据为探索气候与构造联系、地形梯度及深部载荷提供了重要基础，使得地形降水梯度分析与海陆地形关联分析等过去依赖推测的研究得以实现精确量化。

地貌特征与构造事件的测年研究也取得了显著进展。新型低温热年代学技术的发展，以及多种测年方法在样品处理效率（成本、速度、样本量）上的突破，使得可获取的年龄数据量大幅增加。这让我们能够更精确地确定各类地质事件的时序和速率，包括长期和短期的侵蚀速率、构造活动的复发周期，以及各类变形地貌的形成时代等。

我们对地质地貌过程机理的认识正在不断深入，包括断裂动力学、断层蠕变、滑坡触发机制和河流侵蚀作用等。地貌学家越来越擅长选择理想的野外场地——这些特殊区域能保持多个变量恒定，从而有效研究特定过程的主控因素。同时，实验技术方法的进步使得验证概念模型、标定关键参数以及分析简单系统内的相互作用成为可能。这些进展推动了我们对于基于物理原理的构造地貌过程研究的认识。

过去十年，数值模拟在构造地貌学研究中快速发展。如今，高性能计算机已能模拟与实际地貌和构造过程相匹配的时空演变过程。从岩石圈动力学到地形与大气相互作用的各类模型，现已被用于预测动态地形、降水分布、河流剖面、冰川流动以及侵蚀作用的空间差异等。

此外，通过对地质过程速率及其地貌与构造特征的量化分析，我们能更有效地验证和改进模型预测。

新一代的构造地貌学家在过去十年崭露头角。他们不仅掌握了全面的分析技能，还拥有前所未有的过程量化能力，并熟练运用各类数值工具、建模技术和全球数据集。这些新势力

量正在推动学科复兴，这也是本书的核心主题。

本书基本延续了第一版的框架结构：首先，介绍构造变形的地貌标志、测年方法以及断层和褶皱的构造特征；其次，阐述大地测量学定量分析变形的方法和古地震学技术；再次，探讨隆升与侵蚀的量化研究方法；最后，通过三个时间尺度（全新世、中晚更新世和晚新生代）分析构造地貌相互作用。这些时间尺度的选择主要基于构造与侵蚀关系的显著差异，其中全新世以构造主导的非平衡状态为特征。随着时间尺度的延长，侵蚀与岩石隆升可能趋于动态平衡。而在更长的时间尺度内，二者则可能表现为构造-地貌系统的周期性演变。

本书最后一章专注于地貌、地形降水及动态地壳热结构的数值模拟。与第一版相似，我们首先介绍不同类型与尺度的数值模型，随后重点解析地貌形变与侵蚀的“基础模块”。新增内容将着重探讨地形与气候的相互作用、差异侵蚀的热年代学信号、动态地形及长期地貌演化。

本书系统整合了近十年的研究成果，新增超过 500 篇参考文献及 150 余幅插图，其中绝大多数为 2000 年后发表的新成果。我们重点收录了具有突破性的技术方法和重要发现，这些创新成果为理解构造地貌相互作用提供了全新视角。

然而，本书并未试图全面覆盖这一蓬勃发展的领域。例如，尽管海底地形研究取得了显著突破，但是我们基本未涉及水下地形及其反映的构造地貌相互作用。同样，与火山地貌相关的内容也较少做出讨论。在众多应用于构造地貌研究的年代学与地球化学技术中，我们仅选取部分具有代表性的方法进行介绍。尽管如此，我们期望这一版能够为对构造地貌学感兴趣的高年级本科生和研究生提供系统的知识框架，同时为专业研究人员提供有益参考。

本书第二版的完成得益于多方的支持。麦考瑞大学与坎特伯雷大学为作者之一（道格·伯班克）提供了学术休假，在此期间完成主要编写工作。众多合作者、同事及往届学生通过思想碰撞与深入讨论，为本书做出了重要贡献。我们特别感谢以下学者：Bodo Bookhagen、Eric Kirby、Mike Oskin、Jerôme Lavé、Nathan Niemi、Colin Amos、Brian Clarke、Alison Duvall、Beth Pratt-Sitaula、Ian Brewer、Mike Ellis、Jeff Marshall、Alex Densmore、Greg Hancock、Eric Small、Dan Orange、Liz Safran、Niels Hovius、Kelin Whipple、Manfred Strecker、Neil Humphrey、Ann Blythe、Todd Ehlers、Jaakko Putkonen、Peter Molnar、Mark Quigley、Kip Hodges、Ben Crosby、George Hilley、Jean-Phillipe Avouac、Dork Sahagian、Ramon Arrowsmith、Olaf Zielke 和 Ray Weldon。

技术出版方面，感谢编辑 Kelvin Matthews 的细致审校、Pascal Raj 的高效配合，以及 Wiley-Blackwell 出版社 Ian Francis 的耐心协助。本书涉及的诸多理念形成于美国国家科学基金会（项目编号 EAR 00-01044、01-17242、02-30403、02-29911、04-08675、05-07431、08-19874、08-38265）、美国国家航空航天局（项目编号 NAG5-9039、13758，NNX08AG05G）、国家地理研究、石油研究基金及国家地震减灾计划资助的研究项目。最后，衷心感谢家人十年来的持续鼓励与包容。

道格·伯班克

鲍勃·安德森

2011 年 4 月

第一版前言

卫星影像中那些褶皱变形的岩层带总是令人惊叹，它们清晰地刻画了正在或曾经经历过构造变形的区域。构造活动区的地貌本质上是地壳垂向与水平运动同地表侵蚀或沉积过程长期相互作用的结果。可以说，大多数地貌形态正是驱动地表抬升与降低地表的两种力量相互博弈的产物。揭示这种动力学博弈，并阐释其反映的地球动力学与地貌学意义，是构造地貌学的核心研究内容。

构造地貌学是一个高度综合的学科领域，对任何试图从变形地貌中提取构造信息的研究者而言都是一项挑战。以逆冲断层上盘发育的褶皱这类典型的构造地貌研究对象为例，断层沿走向通常切穿地表，但其末端位移会逐渐减小直至消失。褶皱的形态如何反映断层物质的力学性质？单次地震事件的滑移量、变形模式及上盘的生长量如何？逆冲断层的末端侧向扩展范围有多远？地震复发间隔有多长？褶皱的构造形态是仅由同震变形塑造，还是叠加了显著的震间变形？其地表形态又如何被侵蚀-沉积过程改造？沿褶皱是否存在可预测的演化模式？侵蚀速率的主导因素是构造活动还是气候营力？上盘岩石的隆升与侵蚀速率如何量化？二者间的不平衡又如何最终的在地貌形态中体现？要解答这些问题，需要融合古地震学、大地测量学、构造地质学、地貌学、地质年代学、古气候学、地层学及岩石力学等多学科知识，因为每个学科都为理解构造与侵蚀的相互作用提供了不同角度。这些答案的核心线索都蕴藏在地貌中，这也正是构造地貌学的研究对象。

虽然对动态地貌形成过程的探索并非新课题，但过去几十年的若干关键进展奠定了坚实的基础，并开辟了全新的研究路径。

- 新兴的测年技术为许多过去缺乏时间约束的地貌特征建立了时间标尺。多种新定年方法的出现，为确定各类地貌过程的速率提供了关键支持。

- 过程导向的地貌研究加深了我们对地表过程物理机制的认识。通过对侵蚀和沉积物搬运关键过程的理解，发展出了可用于地貌分析的概念模型和定量模型。

- 古气候研究取得重大进展，显著提高了对过去气候变化幅度和速率的观测精度。基于这一进展，现在能够更准确地评估气候变化对地表过程与地貌演化的影响。

- 现代大地测量技术的突破性进展实现了对地表变形的高精度监测。这些技术不仅能精确测定局部点位变形，而且还能获取区域尺度震后形变场的空间分布特征。

- 古地震学作为研究古地震记录的学科，现已形成完整的理论体系，为重建断层活动特征、评估其对周边地貌的影响及其潜在的危害风险建立了科学基础。

- 许多构造地质学家不再局限于区域构造分析，而是聚焦于断层与褶皱的物理特性研究，着重探讨多尺度时空关系下的断层相互作用。这些研究阐明了基本构造单元的演化过程及其对区域变形格局的控制机制。

- 数字地形数据的广泛获取和显著突破，以及穿透植被、云层和海洋的新测量技术的发展，使高精度地形分析成为可能。

- 高速计算的普及促进了数值模拟的发展，这些模型整合了多学科的研究成果。数值模拟不仅能重现观测现象，更有助于揭示变化过程的相互作用、敏感性和响应时间等关键特征。

以上列举未尽，但主旨已明：构造地貌学正迎来前所未有的发展机遇。新方法、新工具与海量数据的融合，正在快速革新我们对构造活跃区地表演化机制的认识。这些前沿议题构成了本书的核心内容。

本书的架构与同类著作有所不同。前几章重点介绍构造地貌学研究的基础单元与相关学科，即地质年代学、断层与褶皱的结构特征、用于识别变形的地貌标志物、大地测量学、古地震学，以及岩石隆升与侵蚀速率的计算方法。不同于传统按地貌类型划分的章节安排，我们选择从不同时间尺度（从不到1万年到超过百万年）来分析地貌演化。这些时间尺度的选择基于我们对构造和地貌信息保存规律的认识，反映了地表过程与构造作用的相对重要性、地貌对事件的记录保存能力，以及气候、侵蚀与构造相互作用的时间特征。不同时间尺度下，可获取的构造地貌信息类型不同，相应的科学问题和技术方法也有所差异。

本书采用这种章节划分方式的原因，可以通过逆冲断层上盘褶皱的实例来说明。在全新世时间尺度上，单次地震事件造成的同震变形会突然改变地貌梯度，进而引发地貌系统的快速调整。地震发生后，变形地表完整地保留了位移场信息，为研究岩石力学性质、位移梯度与地震参数之间的关系提供了理想条件。随后数百年间，断层陡坎逐渐遭受侵蚀，坡面过程和河道调整等地貌过程将持续改造地形，直至与新构造形态达到动态平衡。这一平衡状态将被下一次地震事件打破，开启新的调整周期。在此过程中，最终形成的地貌形态往往是多次地震事件累积应变的结果。

在十万年的时间尺度上，气候变化显著，数十次地震不断改造褶皱形态，侵蚀作用持续切割隆升的褶皱表面。此时的地貌形态与应变场的对应关系减弱，气候影响在褶皱表面留下明显的记录。横跨褶皱的河流最陡段可能从褶皱前翼转移至脊线位置。随着构造隆升加剧和褶皱侧向扩展，相关地貌系统持续发生演化。

在百万年的时间尺度上，褶皱下伏的盲逆冲断层可能与其他断层连接、停止活动，或并入更大的构造系统。此时，地形与应变累积的空间对应关系可能发生显著的解耦，最高地形未必对应构造脊线。然而，通过分析河流梯度、水系分布格局及流域几何特征等要素的空间组合特征，仍能有效揭示褶皱冲断带的长期演化过程。

本书最后一章重点讨论地貌数值模拟。现在的数值模型已能有效模拟复杂变形场及非均一的地表过程，可用于验证传统地貌演化理论，指导野外调查工作，以及辅助教学演示。本章并非建模教程，而是介绍不同类型与尺度的数值模型，提供构建地貌的“基础模块”，即单条断层位移场、造山带尺度深部变形场，以及坡面风化、河道输沙与基岩侵蚀等地表过程的模拟规则。通过从简单断层崖到复杂构造地貌的模拟案例，阐明构造与地表过程的相互作用。

构造地貌学正处于快速发展阶段。本书虽无法涵盖所有最新的研究成果，但旨在为初学者提供系统的学科基础，同时为专业研究者建立参考框架。希望本书能帮助高年级本科生和研究生迈入构造地貌学研究领域。

本书成稿得益于多方襄助。John Grotzinger 邀请 Doug Burbank 赴麻省理工学院讲授构造地貌学课程，催生本书写作构想。南加州大学 Doug Hammond 与 Bob Douglas、维多利亚大学 Dick Walcott 提供后勤支持，Bill Bull、Steve Wells、Ed Keller 和 Paul Hoffman 惠赐建议。我们感谢 Steve Porter、Tom Dunne、Noye Johnson、Bernard Hallet、Jim Smith、Peter Haff 和 Gary Johnson 等导师的学术启蒙，感谢研究伙伴的思想碰撞，特别致谢 Nic Brozovic、Andrew Meigs、Julio Friedmann、Jaume Vergés、Richard Beck、Fritz Schlunegger、Ian Brewer、Mike Ellis、

Jeff Marshall、Alex Densmore、Greg Hancock、Eric Small、Dan Orange、Kelin Whipple、Liz Safran、Eric Fielding、Jerôme Lavé、Niels Hovius、Rudy Slingerland、Hugh Sinclair、Marith Reheis、Peter Molnar、Euan Smith、Ann Blythe、Merri Lisa Formento-Trigilio 和 Jamie Shulmeister 等多位同仁。Doug Myers 及 Blackwells 出版社团队精湛的编校工作令本书增色良多，特别是 Jane Humphreys 和 Jill Connors 的帮助。美国国家科学基金会（项目编号 EAR 92-2056、96-14765、96-27865、97-06269、99-09647）与美国国家航空航天局（项目编号 NAG W-3762、5-2191、5-7781）的资助支撑了书中诸多理念的形成。最后，要由衷感谢我们的家人，尤其是我们的妻子，在我们为这本书倾注心力的过程中，她们给予理解、支持与包容。

道格·伯班克

鲍勃·安德森

目 录

序一

序二

译著前言

第二版前言

第一版前言

1 构造地貌学概论	1
1.1 引言	1
1.2 能量特性.....	4
1.3 活动构造与地貌发展模式.....	5
1.4 新世界.....	8
1.5 一些现代争论.....	10
1.6 未来展望.....	15
2 地貌标志	16
2.1 面状地貌标志.....	17
2.2 线性地貌标志.....	34
2.3 应用地貌标志时常遇到的问题.....	37
2.4 总结	39
3 地貌年代测定方法	40
3.1 相对定年方法.....	40
3.2 绝对定年方法.....	47
3.3 总结	66
4 应力、断层和褶皱	68
4.1 应力、应变和断层.....	68
4.2 地震周期.....	70
4.3 凹凸体、障碍体和特征地震.....	73
4.4 断层位移量变化、断层生长和断层分段.....	78
4.5 断层的地貌表现方式.....	87
4.6 褶皱	101

4.7 总结	108
5 短周期变形：大地测量学	110
5.1 近场技术	112
5.2 远场技术	125
5.3 总结	137
6 古地震：地震破裂和滑动速率	139
6.1 地震矩和矩震级	140
6.2 古地震位错的直接观测	141
6.3 断层活动的间接证据	166
6.4 古地震揭示断裂行为	173
6.5 未解决的问题	180
7 侵蚀和抬升速率	182
7.1 侵蚀和剥蚀速率	183
7.2 抬升速率	216
7.3 总结	228
8 全新世构造变形和景观地貌的响应	229
8.1 基准面	230
8.2 河流侵蚀和河流剖面的理论与展望	231
8.3 裂点	237
8.4 河道模式及特征	243
8.5 总结	259
9 中等时间尺度的变形和地貌	260
9.1 中等时间尺度上未解决的问题	261
9.2 计算变形速率	264
9.3 中等时间尺度的地貌响应	270
9.4 瞬时地貌	281
9.5 断层行为	293
9.6 总结	298
10 新生代晚期构造地貌	299
10.1 热点和未解决的问题	299
10.2 山脉前缘、盆地和正断层	302
10.3 汇聚、褶皱和水系	312
10.4 稳态和预稳态	319

10.5	气候和构造	328
10.6	动态地形	341
10.7	总结	350
11	地貌演化数值模拟	352
11.1	方法	352
11.2	模块构建	354
11.3	规则	354
11.4	陡坎退化模型	361
11.5	海岸阶地的产生	367
11.6	河流侵蚀模拟	369
11.7	山脉尺度的模拟	373
11.8	造山带尺度的模拟	376
11.9	大气的相互作用	379
11.10	冰川模型	383
11.11	热力场模拟	384
11.12	动力地形学	387
11.13	现今模型的局限和未来的发展	388
11.14	总结	389
	参考文献	390

1 构造地貌学概论

1.1 引言

构造地貌学探讨的核心问题主要围绕着两大地貌演化过程（建造地形的构造过程与破坏地形的地表过程）间的竞争关系展开。地球表面为何能够演变成现今的状态以及造成该状态的背后力量长期以来一直吸引着人们的兴趣和关注。一个多世纪以来，人们提出了多种概念模型解释不同构造和气候条件下的地貌演化过程。然而在过去，我们获取地貌构造特征可靠年龄的能力通常非常有限，在缺乏时间框架的情况下，检验有争论的地貌演化概念模型几乎是不可能的。因此，这些未被量化的模型经常受到质疑，仅被当作是猜测性看法。

过去几十年里，新技术在确定地貌单元年龄、评估地貌过程演化机制以及确定地壳运动速率等方面的创新性应用，使构造地貌学研究重新焕发了活力。现在，一个给定点位相对参考点运动速率的测量可以达到毫米级别的精度，并且可以确定汇聚或拉张速率在各个断层和褶皱中具体如何分配。此外，目前的技术手段可以对河流侵蚀、冰川切割基岩以及滑坡剥蚀速率进行量化。显然，这些数据集的汇总能够使我们更好地理解某个点位地壳物质增加速率和侵蚀速率之间的平衡关系，定义这种平衡并解释由此产生的地貌现象构成了现代构造地貌研究的重要组成部分。

构造地貌学的显著特征之一是该学科的广泛性与交叉性。在地质学相关领域中，很少有可能轻易将地震学、第四纪气候变化学、地质年代学、构造学、大地测量学和地貌学融合在一起的学科。事实上，古植物学和断层力学等学科涌现的新数据和新思想促进了构造地貌学的活跃程度，但这种多样性也带来了巨大的挑战，因为成功的研究通常需要融合传统观念中不相关学科的数据。虽然构造地质学或地层学等目前较为成熟的领域的专家依然会对构造地貌学做出相应贡献，然而跨多学科融合才是促使学科产生质变的关键。

本书主要面向已熟悉构造地貌领域基本概念和术语的读者。我们假设读者已理解基准面或共轭断层等基本术语的概念，即便如此，本书依然给出了相关术语的定义，并回顾了部分基本概念和模型。这些地貌或构造相关的基本资料会对没有相关背景知识的读者有所帮助。本书并不会涵盖构造地貌学各分支学科的成果，相反，我们会聚焦过去几十年促进构造地貌学发展的关键工具、方法和概念等。这类研究由若干基础模块组成，包括地球在震中和震间期的变形模式、追溯过去变形特征的方法和地貌特征定年的技术类型。

首先，我们介绍了地貌标志，如海洋或河流阶地等可用于追踪变形的地貌特征。这些标志物在变形前具有已知的平面或线性几何特征，可用于预测性地追溯地貌演化过程。断层或褶皱作用对这些标志物造成变形后，变形的量级可通过与未受扰动的地貌进行比较来确定。因此，对这些位错或变形标志的识别与测量对许多构造地貌的研究都非常重要。这些变形标

志多为亟须进行解释的原始数据。

为了描述变形的速率，我们需要确定变形的时间和量级。幸运的是，现在已经有了几十种可用于确定位错标志年龄的技术。在书中讲述测年的章节里，我们介绍了一些常用案例，并尽量说明每一种技术所适用的场景。我们介绍了每种测年技术的基础概念，讨论了其局限性，并描述了在野外需要采集的样品类型。

“构造过程”是构造地貌领域高频出现的专业术语，是一个包含构造板块运动、单个断层的位移量、韧性变形和均衡过程等各种类型形变的笼统表达。在本书中，我们更关注与地球表面相对局部变形更相关的地貌演化过程，而非与火山活动相关的变形和地表过程。这里提出的许多概念都与火山过程的地貌响应相关，但是在火山和非火山环境中，向地貌系统中添加物质的方式（有时从上部或者仅从下部）以及时空尺度的响应通常是不同的。

单个断层和褶皱的累积运动形成了多种地貌，因此我们对地震学和构造地质学中一些最新的概念进行了描述，包括同震破裂、断层滑动尺度、断层相关褶皱和在不同构造环境（挤压、伸展和走滑断层环境）中的几何变形等。这种变形形成了侵蚀作用导致的基本地貌形态。通过大地测量学研究，人们对地球表面正在发生的大量形变有了更多的了解，并在数年尺度内对区域到局部的形变进行了详细的描述和调查。过去二十年的时间里，全球定位系统（global positioning system, GPS）和雷达干涉测量等新技术的广泛应用为地壳运动新图像的绘制奠定了基础。在关于大地测量学的一章中，我们将对这些技术进行详细阐述。可以说，如今我们在构造变形和地貌演化解译方面取得的进展，很大程度上是建立在对现代变形理解加深的背景下的。

围绕地壳形变速率的相关话题，目前引出了一系列具有争议性的讨论：形变速率是否随时间保持稳定？单个断层是否有规律地定期破裂，并间隔一定时间发生强度基本相同的地震？多组断裂是否以减弱其他断裂的运动为代价而同步加速？部分地表破裂为适应地壳变形而不断产生应力，其空间尺度有多大？在古地震学的相关章节中，我们讨论了一些技术性问题，比如断层历史行为、地震复发间隔和古滑动速率，以及地震是否以时间规律性、随机性或丛集性发生。

大量观点认为，目前构造地貌学研究的核心是某一地区的侵蚀损失量、侵蚀速率以及同区域表面高度随时间变化的方法探索。在新兴的测年工具和数字地形数据库的辅助下，我们现在可以比过去更准确地解决这些问题。在讲述关于侵蚀和隆起的章节中，我们描述了几种量化侵蚀表面隆起和岩石隆起速率的方法，还说明了如何综合这些因素来检验建造地形与破坏地形之间的平衡。

本书的后半部分将不再专注于地貌构建，而是介绍不同时间尺度下地貌演化与构造解译的概念和实例。此外，我们不再将重点放在特定的地貌环境或地貌体上，如河流与冲积地貌等构造过程，而是专注于更综合的研究。这部分的关键议题可以涵盖在两个问题当中：“哪些地表信息可以辅助理解构造和地貌过程之间的相互作用？”“如何通过对现存地貌特征的解译来揭示过去构造变形的速率和模式？”最近的研究通常更适合回答第一个问题，而第二个问题的答案可以追溯到更遥远的过去。

在构造-地貌演化中有一个自然的、随时间变化的过程，我们可以从中获得一些见解。令人惊讶的是，该过程的一部分是由过去的气候变化所决定的（图 1.1）。全新世是气候条件变化相对较小的后冰期时代，而在 10 万年或更长的时间尺度上则发生了完整的多次冰期—间冰期旋回。海平面、冰川大小与河流流量的大规模改变在该时间尺度上留下了强烈的地貌

印记。气候周期旋回是产生地貌标志的“驱动力”，这些标志以冰碛、海洋和河流阶地的形式出现，在构造地貌学领域扮演着非常重要的角色。在百万年或更长的时间尺度上，更多的气候循环可以创造出在时间上更为“平均”的地貌。

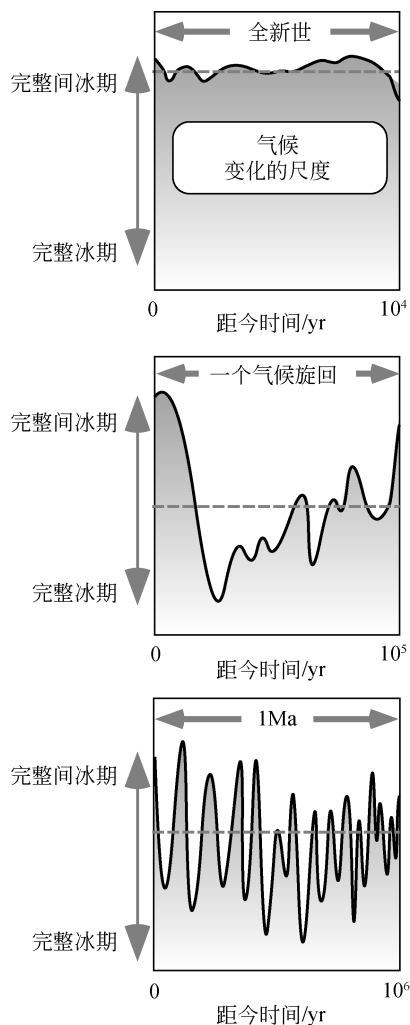


图 1.1 不同时间尺度的气候变化示意图（全新世，一个冰期旋回，中—晚更新世）

全新世气候的改变以 10 万年为周期，10 万年可以覆盖一个完整的冰期—间冰期旋回。同样，在之前的冰期—间冰期旋回周期中，锯齿形的变化模式并没有显示出类似于过去 1Ma 中典型幅度的振荡

以上介绍的不同时间尺度的构造地貌研究聚焦点往往也是不相同的。在全新世时间尺度，因果关系可以直接检验。例如，如果断层作用在给定方向上造成地表倾斜，那么河流对倾斜的响应时间与速率是可以测量的。目前地壳变形的速率与河流中泥沙的加载速率相当。通常，如果河流阶地等地貌标志几乎没有受到侵蚀的影响，那么其可以作为全新世变形的原始记录。全新世研究的优势在于其相关记录往往是最完整的、定年是最精确的、许多竞争过程的速率是可以直接进行测量的，并且它们之间的相互作用是可以检验的。但全新世地貌研究同时也存在一定劣势，这里列举了常见的三种。首先，构造过程的速率可能相当缓慢，或

者变形事件（如地震）罕见，以至于记录到的构造信号很模糊。其次，全新世（间冰期）地貌过程的速率不能很好地代表长期速率。最后，地貌系统对构造作用力的变化做出反应所需要的时间可能比全新世更长。因此，相比于施加在地貌系统上的构造扰动，地貌系统可能仍处于过渡状态。

正如后续章节所述，大多数年代测定技术精度有限，这代表随着学界对全新世和更早年代的了解加深，具体事件与时间的关联变得越来越具有挑战性。因此，确定单个构造事件的直接响应是很困难的。

另外，大规模气候变化往往会产生强有力的地貌标志，如河流阶地，以作为可识别的特征持续存在，并为记录变形模式提供较长的时间框架。在短时间尺度内，构造作用力通常是不稳定的，因为它是由时间间隔很广的离散事件（如地震）造成的。在超过万年的时间尺度上，这种不稳定性通常会减弱，并且可用于确定平均的变形速率。许多地貌标志仅存在于单个冰期—间冰期旋回中，因此这是记录过去构造作用力速率的理想区间。在更长的时间尺度上，侵蚀作用通常会消除掉大多数超过 10 万年历史的标记。然而，正是在这样的时间尺度上才可以清晰地看到大规模地貌景观对持续构造作用力的响应。通常，为了检验构造—地貌相互作用的产物，如碰撞造山带的地形特征或大陆经过热点时发生的大规模变形，必须在较粗略的空间尺度内对景观地貌进行处理。

我们将地貌数值模拟作为本书最终章。与直接测量构造—地貌过程的目的不同，变形和地表过程之间的相互作用也可以从理论上进行研究。如果可以写出算法来描述某些地貌现象，如断层引起的地壳位错或地表过程引起的侵蚀作用和质量的新分布等，就能着手研究这些过程之间的相互作用。例如，正断层的位移可以界定山脉前缘。此外，地形位错将改变每一条穿过断层的河流的局部梯度，河流下切的算法可以预测河流的响应以及这种地貌响应如何持续向上游传播。

近期，不同构造环境的地貌演化模型已被成功建立，本书并不会对这些模型进行详细的描述。相反，我们对若干可用于数值模型的基本模块进行了描述，并且对这些模块的预测效果进行了举例说明。我们认为数值模型的作用并不在于再现某些实际的地貌场景，相反，数值模型为研究地貌间潜在的相互作用提供了一种探索方法，因此，我们有了更坚实的基础来理解地貌变量（如地壳硬度、基岩对滑坡的敏感性和降水分布等）之间是如何以意想不到的方式相互影响的。这样的模型使我们对各地貌过程之间复杂的相互作用有了更深入的了解，并且可用于指导人们在野外进行测量，从而有效地约束地貌过程的速率。

1.2 能量特性

能量驱动着构造与地表过程之间的相互作用。与重力相反的作用为现今地表的形成提供了强大的动力。构造地貌过程所需的能量来自岩石圈水平运动所涉及的少部分能量转换，而驱动板块构造的能量来自与行星形成相关的原始热量、放射性同位素的衰变以及地球内部的相变。

板块运动造成的能量消耗是比较抽象的概念，但如果用日常术语来描述可以得到非常直观且惊人的效果。例如，印度板块与欧亚板块碰撞形成喜马拉雅山脉，我们可以指定其大致尺寸为宽 3000 km、长 7000 km、厚 50 km，若假设它的平均密度为 3000 kg/m^3 ，则其质量约为 $3 \times 10^{21} \text{ kg}$ 。考虑到板块的平均运动速率为 5 cm/yr ，其所产生的动能（ $1/2 mV^2$ ）约为 $4 \times 10^3 \text{ J}$ ，

相当于大约 1/200 的“士力架”棒提供的能量 (10^6 J)! 另外, 印度板块移动的功率 (力 $\times$ 距离/秒) 大约相当于 10^{13} J/s 或每秒 10^7 个“士力架”棒的能量! 在过去的 5000 万年, 很少一部分 (1%) 能量被消耗 (或实际上转换为势能), 将喜马拉雅山脉和西藏地壳抬升到了大地水准面以上, 从而形成了平均海拔约为 5 km 的、世界上最典型的地形异常区域。

驱动地表过程的能量主要源于重力势能与太阳能。所有被抬升到大地上水准面以上的岩石势能都等于其质量、重力加速度和相对大地水准面以上高度的乘积 ($PE=mgh$)。在大气层的顶部, 地球接收到的太阳能约为 1300 W/m^2 。从地球表面接收到的太阳能比从地球内部热能泄漏的能量 (约 40 mW/m^2) 大几个数量级。太阳能蒸发水分并使携带有水分的空气受热上升、膨胀和冷却。水分将会在其大气轨迹的顶端获得最大的势能。当蒸汽凝结并以降水形式下落时, 部分势能转化为动能, 并通过冲击力传递到地球表面。在大地水准面以上某一高度处, 水的势能可能被构造地貌过程转化, 也可能通过散热或摩擦过程被消耗掉。此外, 太阳能也是化学风化过程中一个重要的因素, 特别是在与温度有关的反应和诸如冻融循环等机械风化过程中。

1.3 活动构造与地貌发展模式

在特定的气候或构造条件下, 过往的地质学家针对地貌形态的显著差别设计出多种解释方案。威廉·莫里斯·戴维斯是最杰出的地质学家之一, 他在 19 世纪末和 20 世纪初提出了著名的地貌模型 (Davis, 1899), 展示了地貌从“青年”到“成熟”再到“老年”的发展历程 (图 1.2)。受查尔斯·罗伯特·达尔文革命性思想的影响, 把地貌形态想象成阶段性的演化也许是很自然的, 威廉·莫里斯·戴维斯的模型便是如此。在他的模型中, 构造作用力是一种发生在“地貌循环”开端的脉冲现象。所有地形的建造都发生在循环的开端 (图 1.2)。随后, 地貌过程使得地形受到侵蚀和退化, 预计最终会形成一个准平原。这种地貌演化观点盛行于 20 世纪的大部分时期, 至今仍被地质学的入门教材广泛引用。

瓦尔特·彭克在 20 世纪 50 年代提出了一种与戴维斯模型相反的新的地貌发展理论 (Penck, 1953)。彭克认为并非所有的构造变形都是在循环刚开始时产生的, 构造作用力随时间呈波浪式变化。在该方案中, 变形的幅度逐渐增加到顶点后慢慢减弱。彭克的模型并不主张在经过长时间的侵蚀之后形成一个脉冲型的地形, 其认为变形速率是稳定增加的, 这将会加速岩石的抬升并逐渐建造地形, 使其达到地形起伏的最大状态。在彭克的模型中, 地貌过程被认为在整个造山时期都可以对隆起区造成削弱, 因此所产生的地貌可以被解释为变形和侵蚀作用之间竞争的产物。随着造山速率的减弱, 侵蚀速率超过了变形速率, 从而导致残余地形逐渐减小 (图 1.2)。

哈克提出了第三种地貌发展的方式, 他认为当变形速率和侵蚀速率维持很长一段时间后, 地貌将达到某种平衡或者动态平衡 (Hack, 1975)。考虑到岩石的强度是有限的, 哈克意识到即使构造作用力持续很长时间, 地形也不可能无限制地增加。在某种程度上, 随着地形的不断增长, 山坡起伏会产生超过岩石强度的力而后导致倒塌。随着基岩的持续抬升, 更多的斜坡坍塌将会限制地形所能达到的高度。最终, 地形将进入大致的稳定状态或者保持动态平衡。因此, 在该模型中, 造山速率和侵蚀速率将达到长期平衡 (图 1.2)。与戴维斯模型或彭克模型不同, 哈克模型中的变形速率不必减小到可以忽略的程度, 甚至根本不需要减弱, 同样, 在地形达到“最大持续地形”后, 地貌也不需要“进化”。相反, 它只是一直围绕着

均衡的地形波动，直到构造作用力的速率发生变化。

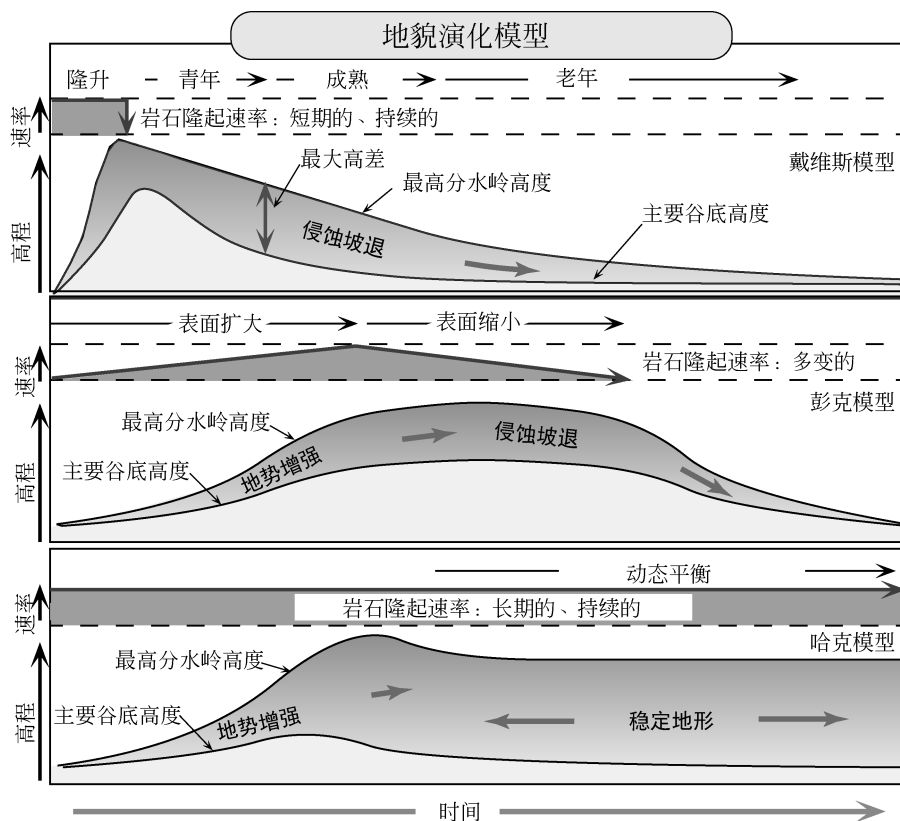


图 1.2 构造作用力和地貌响应的经典模型

Davis (1899) (上图)、Penck (1953) (中图) 和 Hack (1975) (下图) 的地貌响应理论示意图。三种模型主要差别为构造作用力(岩石隆起)持续时间和速率的差异, 以及不同类型的岩石隆起所形成的不同地形响应。改自 Summerfield (1991)

以上三种地貌演化模式是否适用于真实的地貌景观, 解释该问题的一种方法是对变形的时间尺度和地貌响应进行比较。例如, 地震是一种典型的脉冲事件, 它会“瞬间”造成地形的变化, 比如断层陡坎。如果两次地震的时间间隔要长于能引起显著地形演化的地貌过程, 那么陡坎将在下一次地震之前退化。这种地形变化可被认为是戴维斯地貌演化模型的小规模版本。另外, 如果地震的重复间隔很短, 那么陡坎将会持续被更新, 地形就不会以可预测的方式退化至低起伏度的表面。事实上, 在震间期, 断层作用与侵蚀作用对陡坎的改造可能会形成某种平衡。因此, 即使断层总位移会随时间增长, 陡坎本身也可能达到“稳态”形态。

在地貌系统中, 研究不同地貌元素的响应时间或者抗扰动能力也是有价值的。例如, 某个山区的流域盆地由河道网络、山坡、河流间山峰与分水岭组成(图 1.3)。其中一些地貌因素对变形的响应比其他因素更快。假设该盆地在出山口附近被一条正断层错断, 那么盆地中的各种元素将会如何响应断层位移? 跨越断层的冲沟将会首先记录这些位移, 基准面的突然下降会导致河流坡度局部变陡并加剧河道的侵蚀。此时, 流域的其他位置都还没有受到断层

扰动, 因此断裂不会引起初始的地貌响应。随后, 河床的侵蚀可能会沿河流系统向上传播, 侵蚀经过邻近山坡的底部时, 会导致坡度的增加, 并引起山坡过程速率的变化, 这些山坡过程最终会影响汇流与整个流域的形状。一些大型地貌要素, 如流域形状等, 不会受到单次地震事件的影响。因此, 以上介绍的山区流域盆地存在清晰的响应时间的分级 (如河流的响应比山坡的响应更快等), 同时, 地形抵抗扰动能力的分级同样也很明显 (流域形状不易改变, 而河流坡度则容易受到较小扰动的影响)。

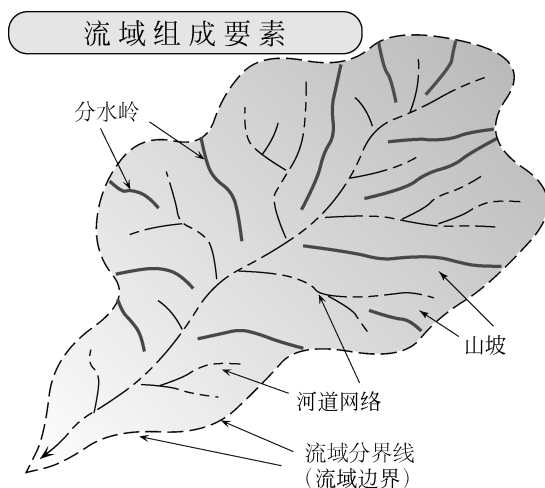


图 1.3 流域盆地的地貌要素

流域的不同地貌组成部分受干扰的先后顺序不同, 其中河道网络的响应最灵敏, 而分水岭处的响应最迟钝

考虑到给定地貌系统中各要素的比例、不同地貌要素对所施加作用力的响应区别, 以及不同类型构造作用力的速率、幅度和持续时间后, 学界提出了一种方法, 可以调和戴维斯模型、彭克模型和哈克模型三种具有明显不相容性的地貌演化概念。事实上, 近期构造地貌扰动的数值模型已经明确地解决了这个问题。利用河道切割、泥沙搬运和山坡侵蚀相结合的地表过程, Kooi 和 Beaumont (1996) 开发了一个预测模型, 能够推断变形开始与地貌系统对变形响应之间的延迟 (图 1.4)。地貌系统的整体响应和滞后的强度极度依赖构造作用力的性质, 如果是脉冲作用力, 地形会迅速构建并随时间简单退化。如果变形随时间增加到最强然后减弱, 地形会随着侵蚀速率的增加逐渐形成, 但岩石隆起速率仍然大于侵蚀速率, 所以最大地形起伏会出现在变形速率开始减弱之后。最后, 在周期的后半段, 尽管侵蚀率逐渐降低, 但地形仍在逐渐减弱。如果构造作用力持续存在, 根据 Kooi 和 Beaumont 的模型预测, 在地形建造的初始间隔之后, 岩石抬升和侵蚀的速率将达到平衡, 地形也将达到持续的动态平衡 (图 1.4), 构造作用力速率的改变将推动系统转向新的平衡, 而变形的停止将使系统恢复到近乎戴维斯模型的状态, 在这种状态下地形会系统地退化。

这些预测是构造和地貌过程数值模型及其简化的代表成果。事实上, 我们目前对这些过程中的物理机制仍然知之甚少。尽管如此, 过去 100 年间前人提出的互相矛盾的地貌发展模型并非不可调和, 而简单的数值模型有助于提高我们对构造活动地貌的理解。

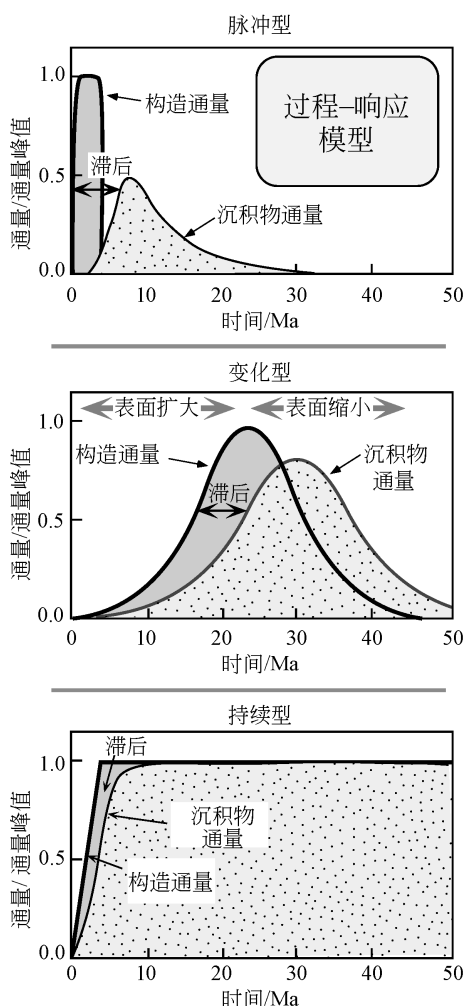


图 1.4 构造与沉积物通量的过程-响应模型

本图对岩石隆起的持续时间和幅度（垂直构造通量）与隆起山脉的侵蚀沉积物通量进行了比较。图中这三种场景（脉冲型、变化型、持续型）类似于图 1.2 中的戴维斯模型、彭克模型和哈克模型。但值得注意的是，构造作用力和沉积物响应之间的时滞是可变的。改自 Kooi 和 Beaumont (1996)

1.4 新 世 界

在过去的二十年里，技术的进步极大地拓展了我们观察地球的视角。随着数字地形多样性和实用性的延伸，我们可以更容易且准确地对地球表面的形状进行可视化处理。在 2000 年 2 月的 11 天里，美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的航天飞机使用主动雷达系统绘制了 $60^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{S}$ 范围的世界地形图 (Farr et al., 2007)。这项任务提供了近乎完整的 90 m 空间分辨率的数字高程模型 (digital elevation model, DEM)。之后根据卫星立体图像，30 m 分辨率的 DEM 被成功开发，这一数据覆盖了 $83^{\circ}\text{N}\sim 83^{\circ}\text{S}$ 的范围，并且可以免费获得。Google Earth 成功地将这种地形数据与遥感图像相结合，为构造地貌学家提供了前所未有的探索地球表面的机会。随着更高分辨率 ($\leq 1\text{ m}$) 的图像越来越

多地纳入 Google Earth, 现在几乎可以在世界任何地方的计算机上直观地观察到各种地貌现象, 如单个断层陡坡、隆起的海洋阶地以及无法实地到达的褶皱上生长的冲沟!

然而, 中纬度温带地区受大规模森林覆盖的影响, 即使是高分辨率的图像, 通常也无法清楚地揭示其真实的地表, 但这种限制也在逐渐被改善。一种被称为激光扫描仪的激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR) 新技术 (Carter et al., 2007) 应运而生, 可利用机载仪器发射的集中光脉冲穿透森林树冠的缝隙。通过测量激光的返回时间和方向, 根据“最后返回的激光”(未被植被反射) 计算激光到达地面的矢量坐标, 通过整合“最后返回的激光”的所有数据, 结合飞行器的精确定位, 可以创建“裸地”的地形图像。图像分辨率的大小取决于飞行器的飞行高度和光束的性质, 通常 LiDAR 技术获取的 DEM 可以达到 1 m 的空间分辨率和几厘米的地形误差。激光雷达的应用取得了惊人的成效, 成功揭示了美国西北部茂密森林树冠下的断层陡坎, 该陡坎之前并未被发现过 (图 1.5)。激光雷达技术的发展打破了质疑, 怀疑者也开始采用 LiDAR 技术获取不同的构造和地貌数据。除机载激光雷达技术外, 安装在三脚架上的地基激光扫描仪也受到了广泛欢迎。基于同样的物理原理, 使用与机载技术相同的仪器可以对单个山坡、断层陡坡或河床进行毫米级到厘米级误差的地形重建; 根据一系列的地形场景, 能够记录和量化地貌变化的细节。从全球地形到个别山坡, 地形获取技术的飞速发展和地形视图精度的大幅提高为地球及其表面过程的观察提供了全新的视角。

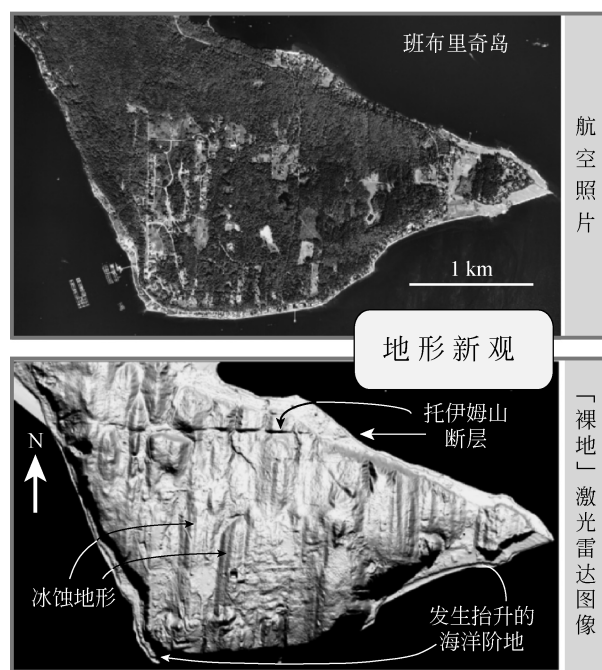


图 1.5 航空照片与“裸地”激光雷达图像在揭示活动断层中的比较

上图为华盛顿州基沙普县普吉特湾内的班布里奇岛南端的航空照片, 图中可见茂密的植被掩盖了地质结构和地貌。下图为使用激光雷达数据建立的地形起伏的“裸地”模型, 图中森林树冠层被移除, 反映了班布里奇岛的气候和构造历史。其中冰川槽和冰脊揭示了冰曾经有由北向南的流动方向, 而北部的线性陡坎是托伊姆山断层的地表证据, 该断层为西雅图断层向北倾斜的逆冲分支, 之前并未被人熟知, 激光雷达图像为该地区的探槽工作提供了基础 (Nelson et al., 2003)。该图片由塞缪尔·约翰逊和美国地质调查局 (USGS) 提供

1.5 一些现代争论

目前，许多激烈的争论围绕构造地貌学展开，引发讨论的同时也为该学科注入了新的活力，其中一部分争论为阅读本书后续章节提供了有趣的背景。例如，许多山脉的新生代岩石冷却历史被解释为晚新生代期间抬升速率增加的结果。之后越来越多的业内专家意识到这种明显的加速与“冰河期”的起始时间几乎处于同一时期，山脉的隆起造成了冷却效应并促成了冰河期的形成。1990年，莫尔纳和英格兰提出了几乎完全相反的看法来挑战这一根深蒂固的观点：在晚新生代，随着气候向冰川环境转变，山脉内侵蚀速率的增加导致河谷下切速率的增加，反之激发了残余山峰的均衡抬升（Molnar and England, 1990）。虽然均衡抬升可以形成较高峰值的山脉，但并不能表明构造抬升是气候变化的原因。

那么，我们该如何判断究竟是气候造成了山体隆升，还是山体的表面隆升改变了气候？这一难题的潜在解决方案需要综合考虑多种因素的性质和量级变化，包括山脉平均海拔、侵蚀速率、山顶与谷底海拔等。此外，这些快速变化究竟于何时何地发生，也是需要关注的问题。对这些问题的思考可以解释构造地貌学研究在本质上为何往往是跨学科的。例如，使用数字地形数据可以很直接地计算出某山脉当前的平均高程，对该山脉之前海拔的估算则涉及更多其他研究方法，如古植物学和同位素研究等。再如，与气候变化相关的问题：冰川期的降水量较多还是较少？冰川扩张是否导致侵蚀速率的加快？与河流相比，冰川是否是更有效的侵蚀营力？关于该问题的争论引发了大量相关研究，主要涉及河流与冰川作用所造成基岩侵蚀的物理和化学过程。

侵蚀速率的加快可以推动山顶的抬升，但只适用于与侵蚀相关的地形起伏度增加的情况。本质上，山顶的侵蚀一定小于谷底。可以将山体想象成一个漂浮在液体中的冰块立方体（图 1.6），水面以上部分的平均高度相当于总厚度的 $1/10$ ，若将立方体在水面以上的部分进行切割，那么立方体表面的平均高度会降低，而其水中的部分则会突然上升以保持平衡（保持水面以上部分为总质量的 $1/10$ ）。若能在不“侵蚀”立方体水面以上部分的情况下切割峡谷，剩余部分则会实际上升到高于其原始高度的海拔以响应平均高程的下降。

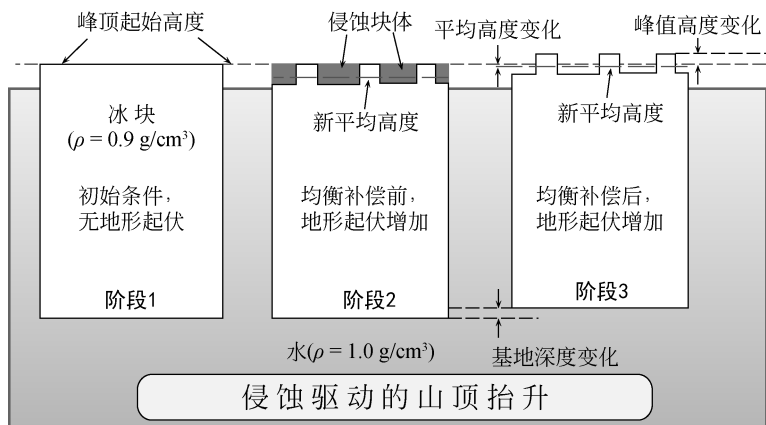


图 1.6 侵蚀加剧造成的山顶均衡抬升

可将冰和水的密度分别类比于地壳和地幔，冰块顶部的侵蚀降低了其质量和平均高度，谷底的侵蚀往往比峰顶更快，导致了峰顶的起伏和隆起的增加，同时降低了平均海拔。请注意阶段 2 永远不会发生，除非有某种力量限制冰块因表面融化而反弹