

数字高程模型在构造地貌形态分析中的应用现状及展望

常直杨¹, 孙伟红², 王建^{3,4}, 白世彪^{3,4}, 张志刚³

(1. 南京旅游职业学院旅游管理学院, 江苏 南京 211100)

(2. 江苏省测绘工程院, 江苏 南京 210013)

(3. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(4. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 构造地貌形态分析法是构造地貌学的基本方法之一, 近年来随着数字高程模型(DEM)的发展, 国内外对构造地貌形态分析的研究随之增多. 本文重点从基本地形因子研究、水系流域地貌、夷平面与古地貌面、构造活动评估、构造地貌分区、地貌发育模式及地貌参数计算工具开发等7个方面, 总结了DEM在构造地貌形态分析中的研究应用现状和主要不足, 以及存在的键和难点问题. 总的来看, 研究对象多集中在典型河流及流域、山前活动断裂带、板块交接构造活跃处、古地貌面; 研究过程经历了从初期地貌形态的简单分析到多种地形参数的分析应用及其在地貌发育中应用的转变; 研究尺度从几百平方千米的小流域至几十万平方千米的地貌体不等. 但在构造活动带的内陆地区, 构造活动等级划分的方法、多层次、多角度地貌参数研究等方面仍需改进及深入拓展. 最后针对存在的问题, 对DEM在今后构造地貌形态分析中的应用进行了展望.

[关键词] 数字高程模型, 构造地貌形态, 地貌参数, 构造活动, 研究进展

[中图分类号] P931.2; P542 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2015)04-0129-08

Application of DEM in the Morphological Analysis of Tectonic Geomorphology: Status and Prospect

Chang Zhiyang¹, Sun Weihong², Wang Jian^{3,4}, Bai Shibiao^{3,4}, Zhang Zhigang³

(1. School of Tourist Management, Nanjing Institute of Tourism & Hospitality, Nanjing 211100, China)

(2. Jiangsu Province Surveying & Mapping Engineering Institute, Nanjing 210013, China)

(3. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(4. MOE Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Structural morphology analysis method is one of the basic methods of tectonic geomorphology, the research on structural morphology analysis is developing with the development of the Digital Elevation Model (DEM) in recent years. Firstly, current researches and application of the DEM analysis to structural morphology were summarized and reviewed from seven points of view: basic terrain factor research, drainage basin landform, planation surface or paleo-surface reconstruction, tectonic activity evaluation, partition of tectonic geomorphology, landscape development model, and geomorphic parameter calculation tools. The key and difficult problems are also introduced. Then this paper summarized that the object of these studies are focused on the typical rivers or river basins, piedmont fault zone, tectonic activity plate, paleo-surface; Research process has experienced the change from the initial simple analysis to the application of terrain parameters of morphology analysis and with the application in landscape development; The research scale is from hundreds of square kilometers of the small watershed to thousands of square kilometers of the landscape. But the application of geomorphic index in inland areas, the method of tectonic activity hierarchy, multi-level and multi-angle geomorphic research still need to improve and further develop. Lastly, the view of the existing problems, and the digital elevation model in the application of the structural morphology analysis in future is prospected.

Key words: Digital Elevation Model (DEM), structural morphology, geomorphic index, tectonic activity, research process

收稿日期: 2014-12-23.

基金项目: 国家自然科学基金(40871010)、南京旅游职业学院科研创新团队项目(2015YTD10).

通讯联系人: 王建, 教授, 博士生导师, 研究方向: 自然地理学、地貌学、第四纪地质学. E-mail: jwang@vip.sina.com

构造地貌是指受构造内动力作用控制,通过内外地质动力的相互作用所奠定的能够反映一定构造特征的地貌形式^[1].形态分析是构造地貌最基本也是最主要的分析方法,因为形态是地貌的基本要素,蕴含着地质构造及近期构造活动的丰富信息,通过分析地形地貌的形态特征,可以从中识别和区别出地质构造及活动构造等内动力与侵蚀风化等外动力因素的作用.

近年来,得益于DEM及地理信息系统(GIS)的发展,相比传统的地形图,人们可以更直观、细致地观察地形,研究地形数据结构^[2-3],构造地貌的形态结构研究也可以利用很多基于DEM所衍生的参数来定量描述,而地貌的结构形态受构造运动的影响又十分显著,因此近年来很多学者通过定量分析相关地貌参数来研究构造活动,使构造地貌过程研究由定性进入了半定量和定量化阶段^[4-9].这些构造地貌指标有三维实体性的描述^[7,10-11],如面积高度积分,有二维平面性的描述^[4,12-13],如地形分维数及流域对称度,有一维线性的描述^[4,14-18],如河长坡降指数与Hack剖面、山麓弯曲度、河床弯曲度、河流陡峭指数及河谷宽深比等.通过这些参数可以多维度、全方位对构造地貌进行描述与分析,并获取构造活动的多层次信息^[7,9],极大地促进了构造地貌研究的发展.然而这些基于DEM所衍生的地貌参数在具体应用研究时其适用条件、研究对象及研究方法能否改进等仍需进一步拓展.为此,本文对DEM在构造地貌形态分析中的应用现状进行了整理和分析,并进行了展望,旨在为今后的研究提供参考和建议.

1 DEM数据简介

数字高程模型是对地球表面形态的数字表达和模拟,基于DEM的地貌研究实质上也就是数值计算过程,随着数据获取及存储技术的发展,DEM数据模型发展迅速.通常,DEM的数据结构组织表达主要包括二维数据矩阵、规则格网(GRID)、不规则三角网(TIN)等^[19],其中,规则格网DEM在地学研究中的应用最为广泛^[20].另外,DEM数据的获取途径主要有地形图等高线的数字化、基于矢量数据转换的规则格网模型、基于航空影像的摄影测量数据、基于立体卫星影像的数字摄影测量、基于合成孔径的雷达成像技术(SAR)等.目前,SRTM DEM、ASTER GDEM(表1)等覆盖全球范围的高精度DEM数据可以免费获取,这些数据的出现为大尺度宏观地貌研究提供了支持,极大地推动了DEM在构造地貌研究中的应用拓展,国际上已将其作为一种常规的地形地貌研究手段和工具^[11,21-22].

表1 SRTM及ASTER DEM数据基本情况

Table 1 The basic introduction of SRTM and ASTER DEM

参数	SRTM	ASTER
平面基准	WGS-1984	WGS-1984
高程基准	EGM96	EGM96
垂直精度	±20 m	±20 m
水平精度	±16 m	±30 m

2 DEM在构造地貌形态分析中的研究现状

综合目前的研究,DEM在构造地貌应用中的研究主要包括以下几个方面:①基本地形因子研究;②水系流域地貌;③夷平面及古地貌面;④构造活动评估;⑤构造地貌分区;⑥地貌发育模式;⑦构造地貌参数计算工具开发.下面分别对上述各方面研究现状进行整理和分析.

2.1 基本地形分析的研究

不同的地形因子可以从不同侧面反映地形特征,从其所描述的空间区域范围,常用的地形因子可以划分为微观地形因子与宏观地形因子两种基本类型^[19].其中,微观的地形因子包括坡度、坡向、坡度变率、平面曲率、剖面曲率及坡长,宏观地形因子包括坡形因子、地形粗糙度、地形起伏度、高程变异系数及地表切割度.通过分析这些常用的地形因子与地貌特征之间的关系,可以利用监督分类提取夷平面^[23];可以利用海拔、坡度分布直方图及不同海拔区间上地貌指数变化特征(图1,笔者统计青藏高原东缘白龙江流域不同高程的面积,揭示该流域地貌面分布特征),分析地貌面的分布特征及规律^[24];也可以利用这些简单的地貌参数进行构造特征分析^[21].另外,高程剖面线法,通

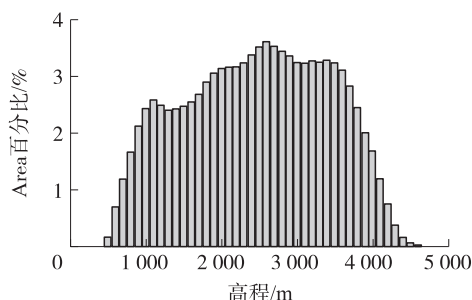


图1 白龙江流域高程分布直方图

Fig.1 The histogram of height about Bailongjiang basi

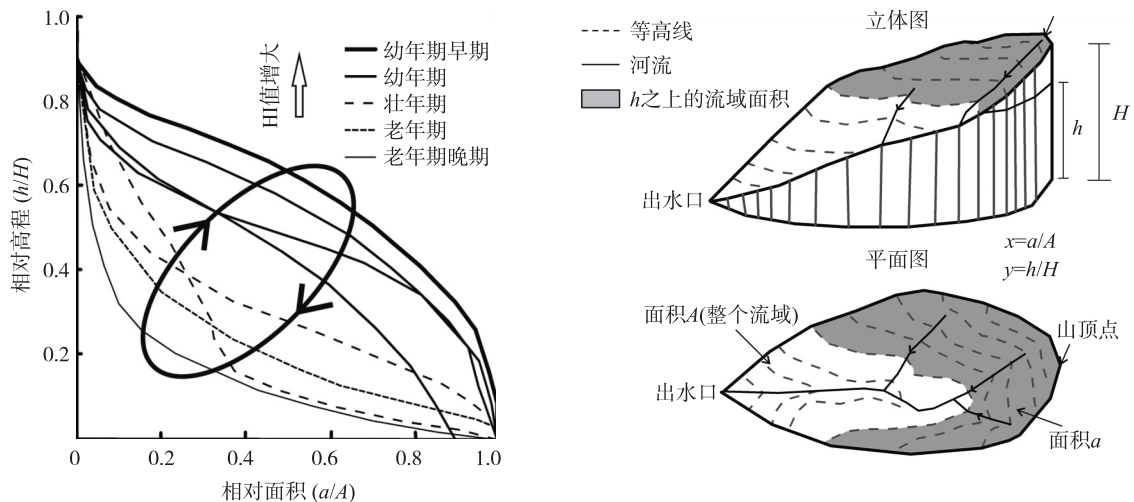
常以线代面来研究不同区域的地貌形态、轮廓形状、地势变化以及地表切割强度等^[6],辅以地质资料图、降雨量等能够很好地反映出研究区地貌变形与构造带之间、降雨侵蚀量之间的变化^[25].洪顺英等^[26]基于DEM数据通过地形高程、地表坡度及地形剖面等分析手段,分析了阿尔泰山地区的构造地貌特征.赵洪壮等^[27]、杜国云等^[28]也利用地形剖面线分别划分了北天山、西准噶尔山地区不同级别夷平面的分布.

2.2 水系流域地貌的研究

河流地貌是构造地貌研究中十分重要的地貌标志,并且由于河流对构造活动的响应十分敏感,且随着DEM精度的提高及河网算法的改进,水系流域地貌在构造活动中的应用日益重要.国内早期的工作以张会平等^[6]对青藏高原东部岷江流域的研究为典型,作者提取了岷江水系中67个亚流域盆地的流域面积、河流长度及分支比等典型地貌参数,通过对地貌参数及河道纵剖面的统计分析,揭示了岷江水系东西两侧截然不同的地貌特征,这些地貌参数反映了岷江水系两侧晚新生代构造活动的差异性,并印证了岷江断裂东西两侧晚新生代以来的不平衡抬升.类似的工作在黄河中游晋陕峡谷^[29]、抚仙湖流域、渭河水系流域^[30-31]均有开展,均是从水系地貌参数的差异反映断裂及构造活动的差异.另外,利用河流的形态因子如河流的蜿蜒度在古今河道对比研究中也应用^[32].

而近些年,随着河流纵剖面形态拟合和水力侵蚀模型的发展使构造活动的研究进一步得以量化.曹凯等^[33]利用河流坡降指标(SL参数)和Hack剖面2个地质参数,对昆仑河纵剖面坡度变化进行了详细刻画和研究.赵洪壮^[34]利用Hack剖面、河长坡降指标(SL)等参数,对北天山流域的活动构造进行量化分析.利用Hack剖面及SL指数主要是与断裂活动、岩性进行对比分析,在气候差异不大、构造或岩性某一因素不变的前提下,可揭示出另一种因素对Hack剖面及SL指数值变化的响应^[14-15,33-35].

基于水力侵蚀模型所衍生的地貌参数主要是河流陡峭指数及凹度指数.在美国加州北部King Range地区、Santa Ynez山脉、San Gabriel山脉、Siwalik山、祁连山北翼、天山北麓的研究^[5,17-18,36-39]均表明,河流陡峭指数与构造抬升有很好的-致性;当把整个河段作为整体研究时,河流陡峭指数可能反映不出构造运动的信息,而将其进行分段研究,则可以反映不同河段的地貌构造差异作用^[40],可以从河流分段尺度而不是传统的流域尺度揭示出河流形态地貌参数对构造的响应.此外,河流纵剖面的拟合函数及凹度指数也能揭示地貌的演化发展阶段^[15,39,41].而流域面积高程积分值(HI)(图2)的大小,其对流域面积的依赖与空间的分布特征及积分曲线的形态也能反应构造活动及岩性的相对作用^[10,15,42-45].



a 为子流域集水盆地内某一高程的截面积, A 为该流域最低高程的截面积; h 为子流域集水盆地内某点的高程与流域最低高程的高差, H 为该流域的最大高程.

图2 面积高程积分的定义、计算方式及代表的地貌发育阶段^[10]

Fig.2 The definition and formula of the hypsometric integrate and the different phases of the landscape evolution

2.3 夷平面及古地貌面的研究

利用DEM及残存的各种地貌标志,如夷平面、阶地及盆地沉积物,可以重建古地貌形态,得出相对应时期的地貌形态,如果结合地质证据还可以探讨地质历史时期的构造隆升与地表过程等^[46-51].早期学者JOHN C H^[51]利用趋势面分析方法对英国威尔士西部地区的山顶点进行分析,认为Brown对该地区提出的

有三级夷平面的说法比较合理. 随着DEM精度和GIS软件分析能力的提高,恢复古地貌面(包括夷平面)的应用越来越多. Small等^[46]采用30 m分辨率的DEM以坡度 0.3° 作为最大阈值、高程2.7 km作为最小阈值构建了研究区的峰顶面,与真实DEM作插值定量分析了该地区的侵蚀量. 随后,Mcmillan^[52]选取典型地层地貌标志对美国西部Rocky Mountains地区古地貌面进行了重建工作;张会平^[49]利用SRTM-DEM数据和1:50万数据地质图,完成了青藏高原东北端更新统古沉积面的恢复;高明星^[50]则对前人在对古地貌面进行恢复时的样点选择方法进行了对比分析和改进;Bonow^[53]对格陵兰地区的典型地貌进行了恢复;Perez-Pena等^[54]恢复了Guadix-Baza盆地的古地貌面,并结合测年结果,估算了该地区的地表侵蚀速率.

2.4 构造活动评估的研究

早期的构造活动评估研究,多集中山前带及某一段断裂附近,且用的地貌参数指标并不多,例如,Bull等^[55]、Silva等^[56]利用山前曲折度和谷底宽深比值比较分析了山前带的活动构造,并利用不对称度值和形状指数量化了构造掀斜程度;Wells等^[57]对东太平洋构造活动带进行了较早的构造活动分级研究;Azor等^[4]运用一些活动构造指数在南山-橡树岭地区进行构造地貌分析,为褶皱的生长提供定量化信息;马保起等^[58]利用Vf值对大青山的地貌特征及新构造意义进行探讨;闫冬冬等^[59]利用SL、HI和Bs对六棱山北麓断层中段的5条冲沟进行量化研究.

目前,普遍认为多种地貌参数在构造活动分级中的应用比单一的地貌参数更有说服力^[60]. 而在研究对象上则多以流域单元为主,Hamdouni等^[7]利用GIS技术提取了西班牙南部内华达山脉地区的6种地貌参数,并对其进行分类,提出了评估整体地区构造活动强度的新方法;Alipoor等^[61]提取了伊朗西南部5种地貌参数值,并利用层次分析法对El Hamdouni所提出的构造强度评估方法进行了改进,指出该地区将会发生地震引发的自然灾害. 此外,在印度Narmada-Son断裂带地区、伊朗西南部扎格罗斯褶皱带渭河流域地区等地区都有类似的研究^[8, 62-63]. 作者提取了青藏高原东缘白龙江流域的多种地貌参数,完成了白龙江流域相对构造活动强度的划分(图3).

然而,上述构造地形指标多适用于高变形速率的断层区域^[4, 14-15]. 在变形速率较低区域的研究还存在争议,虽然Pedrera等^[65]的研究表明一些地貌指数(面积高度曲线分析、标准化SL指数和河谷宽高比)在变形速率较低区域识别活动构造也具有实用性,但这仍需在其它低变形速率地区研究的证明.

2.5 构造地貌分区的研究

地貌分区是地学研究的基础内容之一,以往地貌分区的研究多涉及地貌形态的划分^[66],而很少涉及构造作用与地貌分区之间的关系. 目前开展构造地貌分区的研究工作仍然较少. Sung等^[67]指出在地表构造特征较不明显的台湾西部海岸平原区,地形分形参数能捕捉到地形因地下构造活动影响而产生的细微变化,通过分维值和截距值把台湾聚类分为3个地貌区,并从地貌受侵蚀作用、扩散作用、堆积作用影响的不同尺度分析了3个地貌区分维值大小的差异. 孙棱翔等^[68]则利用一级河道坡度、水系密度、河流频率密度比、崎岖数4项地形计测指标探讨八卦山背斜集水区地形特征的分区及该分区的活动构造上意义. 毕丽思等^[12-13]利用分维值和截距值完成了鄂尔多斯块体及周边地区的地貌定量分区研究. 这些工作从构造角度为地貌分区的工作提供了新的视角.

2.6 地貌发育模式的研究

地貌发育的成因、机制、模式等,一直是地貌学家研究的重点及难点,构造地貌参数的应用很大地促进了该领域的发展. 例如,长期以来,关于Sierra Nevada山区的地貌成因有多达6种观点,Figueroa等^[69]通过研究山前带河流剖面、山前曲折率、河流宽深比、起伏比等地貌参数,根据前人对地貌参数等级的分类,确定了Sierra Nevada地区山前带的地貌构造活动性,通过地貌参数特征的研究,发现这些地貌参数与对

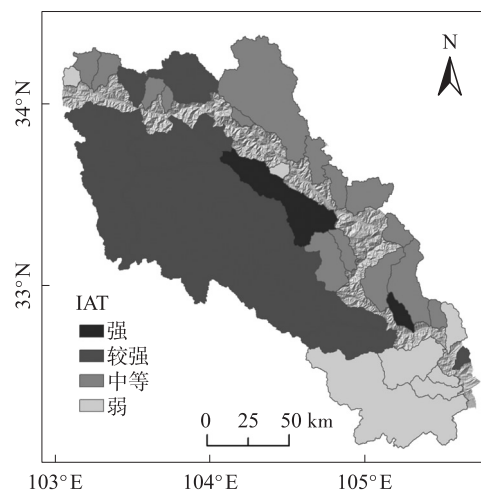


图3 白龙江流域构造活动相对程度^[64]

Fig.3 Distribution of tectonic activity classes in Bailongjiang basin

Sierra Nevada 山区地貌成因的 6 种观点的解释并不符,根据参数值代表的构造活动性,提出了解释该地区地貌演化发展的新观点。

而利用 DEM 提取的地貌参数也可以作为一种地貌判读的辅助依据,与传统第四纪研究如河流阶地、古滑坡的研究相结合,更能揭示地貌的发育特征^[70-72]。埃塞俄比亚西北高原地区的地貌成因长期以来也有两种观点,Ismail 等^[73]利用 90 m DEM 数据对该地区 Tekeze 河及蓝色尼罗河进行了构造形态演化分析,提取了主要支流的河流陡峭指数、凹曲度及回归系数。通过对这些指数的分析,结合已有的地质年龄数据,提出了埃塞俄比亚高原经历了 3 种地貌发育阶段的新观点。另外,秘鲁 Fitzcarrald Arch 地区^[22]、西班牙地区 Guadix-Baza 盆地^[74]的地貌参数研究则对已有的地貌发育模式起支持作用。

2.7 构造地貌参数计算工具的研究

Shahzad 等^[75-76]结合 Matlab 开发了 TecDEM 软件,可以提取常用的小流域地貌参数;Perez-Pena 等^[77]开发了可嵌入 Arcmap 模板的 CalHypso 工具来对流域 HI 值特征进行统计计算;Whipple 等^[37]及 Wobus 等^[38]结合 Matlab 开发了提取河流陡峭指数、凹曲度、河流纵剖面形态的 Profiler 模块。这些地貌指数提取工具的应用,使得研究工作更加准确、便捷,并且这些工具是目前国际地貌研究开展工作的主流工具^[9,11,22,75-77]。

3 结论与展望

3.1 研究展望

基于 DEM 所衍生的构造地貌参数在构造地貌形态分析中的应用是当前乃至今后长期的研究热点。一方面,随着 DEM 数据分辨率的不断提高,无论是宏观地貌还是微观地貌,DEM 是人们研究构造地表过程的一种高效便捷方法和手段。另一方面,在条件恶劣、传统测年较少开展的大面积区域,利用 DEM 开展地貌参数的研究能够为随后开展的工作奠定良好的基础。结合已有的论述,今后的研究应注意以下几点:

(1)利用面积高程积分值、河流阶地指数及河谷宽深比等地貌参数在变形速率较低区域开展研究,检测并识别其活动构造的实用性。

(2)在构造活动等级划分时,可以根据专家经验对各个地貌参数赋予对应的权重,利用决策树分析构造活动等级;也可以利用聚类分析等方法归类地貌单元,分析各个地貌单元内的地貌参数值特征。

(3)为了提高研究工作的效率,有些地貌指数如河流阶地指数的计算,虽然利用 Arcgis 软件分步骤操作可以实现,但如根据计算原理,基于 Arcgis 平台或 Matlab 平台等开发相应的计算工具,则能带来更多的效率。

(4)构造地貌分区的工作目前国内外的研究仍较少,借鉴已有的研究思路,青藏高原及其邻近地区的地貌分区的工作有待开展。分维值、截距值所代表的地质意义、构造意义和相互之间的关系及影响机制有待探究。

(5)河网及一些地貌参数(河流阶地指数、山前曲折度等)的提取受 DEM 数据精度的影响显著,在小流域构造地貌形态分析时,应尽可能地利用高分率遥感影像或大比例尺地形图建立高分辨率 DEM。

(6)今后的研究应注重学科交叉的应用。如在构造地貌分区时借鉴遥感影像处理等图像分类方法及面向对象分类平台 ecognition,在恢复古地貌面或利用基岩侵蚀模型揭示地貌发育过程时,某些数学模型的应用则会为研究工作开启另一扇成功的窗户。

3.2 结语

总的来看,构造地貌参数的研究主要集中在基本地形因子研究、水系流域地貌、夷平面与古地貌面、构造活动评估、构造地貌分区、地貌发育模式及地貌参数计算工具开发等 7 个方面。总的来看,研究对象多集中在典型河流及流域、山前活动断裂带、板块交接构造活跃处、古地貌面;研究过程经历了从初期地貌形态的简单分析到多种地形参数的分析应用及其在构造活动评估、地貌发育模式中应用的转变;研究尺度则从几百平方千米的小流域至几十万平方千米的地貌体不等。但仍存在一些问题需要解决,如常用的地貌参数是否适用于低变形速率地区尚需研究;构造活动等级划分方法需要改进;某些参数如分形参数所代表的地质意义、构造意义和相互之间的关系及影响机制尚需探究;新的地貌参数及计算工具有待发展;构造活动带的内陆地区(如青藏高原及其邻近地区),其构造活动等级划分的方法,多层次、多角度地貌参数研究等方面仍需改进及深入拓展等等。

[参考文献]

- [1] 王岸,王国灿. 构造地貌及其分析方法述评[J]. 地质科技情报, 2005, 24(4): 7-20.
- [2] 刘少峰,王陶,张会平,等. 数字高程模型在地表过程研究中的应用[J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 54-58.
- [3] 张会平,杨农,刘少峰,等. 数字高程模型(DEM)在构造地貌研究中的应用新进展[J]. 地质通报, 2006, 25(6): 660-669.
- [4] AZOR A, KELLER E A, YEATS R S. Geomorphic indicators of active fold growth; south mountain-oak ridge anticline, Ventura basin, southern California[J]. Geological society of America bulletin, 2002, 114(6): 745-753.
- [5] KIRBY E, WHIPPLE K X, TANG W, et al. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: inferences from bedrock channel longitudinal profiles[J]. Journal of geophysical research, 2003, 108(B4): 2 217.
- [6] 张会平,杨农,张岳桥,等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 126-135.
- [7] HAMDOUNI E I, IRIGARAY C. Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (Southern Spain) [J]. Geomorphology, 2008, 96(1/2): 150-173.
- [8] 李利波,徐刚,胡健民,等. 基于DEM渭河上游流域的活动构造量化分析[J]. 第四纪研究, 2012, 32(5): 866-879.
- [9] GAO M X, GEROLD Z, XU X W, et al. DEM and GIS analysis of geomorphic indices for evaluating recent uplift of the north-eastern margin of the Tibetan Plateau, China[J]. Geomorphology, 2013, 190(15): 61-72.
- [10] STRAHLER A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. Bulletin of the geological society of America, 1952, 63(11): 1 117-1 142.
- [11] CHENG K Y, HUNG J H, CHANG H C, et al. Scale independence of basin hypsometry and steady state topography[J]. Geomorphology, 2012(171/172): 1-11.
- [12] 毕丽思,何宏林,魏占玉,等. 利用分形参数进行地貌定量分区研究——以鄂尔多斯块体及周边为例[J]. 第四纪研究, 2011, 31(1): 137-149.
- [13] BI L S, HE H L, WEI Z Y, et al. Fractal properties of landforms in the Ordos Block and surrounding areas, China[J]. Geomorphology, 2012(175/176): 151-162.
- [14] BROOKFIELD M E. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: rivers draining southwards[J]. Geomorphology, 1998, 22(3/4): 285-312.
- [15] CHEN Y C, SUNG Q C, CHENG K Y. Along-strike variations of morphotectonic features in the western foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream gradient and hypsometric analysis[J]. Geomorphology, 2003, 56(1/2): 109-137.
- [16] 张会平,张培震,樊祺诚. 河流裂点的发育及其溯源迁移:以鸭绿江—望天鹅火山区为例[J]. 中国科学, 2011, 41(11): 1 627-1 635.
- [17] 胡小飞,潘保田, KIRBY E, 等. 河道陡峭指数所反映的祁连山北翼抬升速率的东西差异[J]. 科学通报, 2010, 55(23): 2 329-2 338.
- [18] KIRBY E, WHIPPLE K X. Expression of active tectonics in erosional landscapes[J]. Journal of structural geology, 2012, 44: 54-75.
- [19] 汤国安,刘学军,闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理和方法[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [20] 杨昕,汤国安,刘学军,等. 数字地形分析的理论、方法与应用[J]. 地理学报, 2009, 64(9): 1 058-1 070.
- [21] GROHMANN C H, CLAUDIO R, FERNANDO M A. SRTM-based morphotectonic analysis of the Pocos de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil[J]. Computers & Geoscience, 2007, 33(1): 10-19.
- [22] REGARD V, LAGNOUS R, ESPURT N, et al. Geomorphic evidence for recent uplift of the Fitzcarrald Arch (Peru): a response to the Nazca Ridge subduction[J]. Geomorphology, 2009, 107(3/4): 107-117.
- [23] 刘勇,王义祥,潘保田. 夷平面的三维显示与定量分析方法初探[J]. 地理研究, 1999, 18(4): 391-398.
- [24] 刘静,丁林,曾令森,等. 青藏高原典型地区的地貌量化分析——兼对高原夷平面的讨论[J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 285-299.
- [25] FIELDING E J. How flat is tibet?[J]. Geology, 1994, 22(2): 163-167.
- [26] 洪顺英,申旭辉,荆凤,等. 基于SRTM-DEM的阿尔泰山构造地貌特征分析[J]. 国土资源遥感, 2007(3): 62-68.
- [27] 赵洪壮,李有利,杨景春,等. 天山北麓流域面积高度积分特征及其构造意义[J]. 山地学报, 2009, 27(3): 285-292.
- [28] 杜国云,吕辉河,王国灿,等. 西准噶尔山地四级夷平面的划分及构造地貌分区[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 256-263.
- [29] 施炜. 黄河中游晋陕峡谷的DEM流域特征分析及其新构造意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2): 288-298.

- [30] 程三友,李英杰. 抚仙湖流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 地质力学学报,2010,16(4):383-392.
- [31] 程三友,王红梅,李英杰. 渭河水系流域地貌特征及其成因分析[J]. 地理与地理信息科学,2011,27(3):45-49.
- [32] 江华军,李长安,张玉芬. 嘉陵江古河道的河曲特征[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2013,38(2):417-422.
- [33] 曹凯,王国灿,王岸. 东昆仑山昆仑河纵剖面地貌分析及构造涵义[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2007,32(5):713-721.
- [34] 赵洪壮,李有利,杨景春. 北天山流域河长坡降指标与 Hack 剖面的新构造意义[J]. 北京大学学报(自然科学版),2010,46(2):237-244.
- [35] 吉亚鹏,高红山,潘保田,等. 渭河上游流域河长坡降指标 SL 参数与 Hack 剖面的新构造意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2011,47(4):1-6.
- [36] SNYDER N P, WHIPPLE K X, TUCKER G E, et al. Landscape response to tectonic forcing: digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California[J]. Geological society of American bulletin, 2000, 112(8):1 250-1 263.
- [37] WHIPPLE K X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens[J]. Annual review of earth planetary sciences, 2004, 32: 151-185.
- [38] WOBUS C, WHIPPLE K X, KIRBY E, et al. Tectonics from topography: procedure, promise, and pitfalls[J]. Geological society American special paper, 2006, 398:55-74.
- [39] 赵洪壮,李有利,杨景春,等. 天山北麓河流纵剖面与基岩侵蚀模型特征分析[J]. 地理学报,2009,64(5):563-570.
- [40] GOSWAMI R, BROCKLEHURST S H, MITCHELL N C. Erosion of a tectonically uplifting coastal landscape, NE Sicily, Italy[J]. Geomorphology, 2012(171/172):114-126.
- [41] 李宗盟,高红山,潘宝田,等. 贺兰山水系流域数值地貌特征及其构造指示意义[J]. 干旱区地理,2012,35(3):422-429.
- [42] HURTREZ J E, LUCAZEAU F. Investigation of the relationship between basin morphology, tectonic uplift, and denudation from the study of an active fold belt in the Siwalik Hills, central Nepal[J]. Journal of geophysical research, 1999, 104(B6): 12 779 - 12 796.
- [43] 王林,何仲太,马保起. 岱海流域地貌演化及其对断裂活动性的指示意义[J]. 第四纪研究,2008,28(2):310-318.
- [44] 赵洪壮,李有利,杨景春,等. 面积高度积分的面积依赖与空间分布特征[J]. 地理研究,2010,29(2):271-282.
- [45] 张敬春,李川川,张梅,等. 格尔木河流域面积-高程积分值的地貌学分析[J]. 山地学报,2011,29(3):257-268.
- [46] SMALL E E, ANDERSON R S. Pleistocene relief production in Laramide mountain ranges, Western United States[J]. Geology, 1998, 26: 123-126.
- [47] RODRIGUEZ F, MAIRE E, COURJAULT-RADE P, et al. The Black Top Hat Function applied to a DEM: a tool to estimate recent incision in a mountainous watershed (Estibere Watershed, Central Pyrenees)[J]. Geophysical research letters, 2002, 29(6):91-94.
- [48] MONTGOMERY D R, JORGE LOPEZ-BLANCO. Post-oligocene river incision, southern sierra madre occidental, Mexico[J]. Geomorphology, 2003, 55(1/2/3/4):235-247.
- [49] 张会平,刘少峰. 青藏高原东北缘循化—贵德盆地及邻区更新世时期沉积与后期侵蚀样式研究[J]. 第四纪研究, 2009, 29(4):806-816.
- [50] 高明星,刘少峰. 青海贵德—共和—同德地区更新统最小古沉积面恢复与全新世侵蚀量计算[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1):99-104.
- [51] JOHN C H. A trend-surface analysis trial for the planation surfaces of north Cardiganshire[J]. Transactions of the institute of British geographers, 1970, 50: 107-114.
- [52] MCMILLAN M E. Basin fill, erosion surface and tilted markers: evidence of Late Cenozoic tectonic uplift of the Rocky Mountain orogenic plateau[D]. Laramie: University of Wyoming, 2003.
- [53] BONOW J M, KARNA L B, JAPSEN P. Palaeosurfaces in central West Greenland as reference for identification of tectonic movements and estimation of erosion[J]. Global and planetary change, 2006, 50(3/4):161-183.
- [54] PEREZ-PENA J V, AZANON J M, AZOR A, et al. Quaternary landscape evolution and erosion rates for an intramontane Neogene basin (Guadix-Baza basin, SE Spain)[J]. Geomorphology, 2009, 106(3/4):206-218.
- [55] BULL W B, MCFADDEN L D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California[C]//Doehring D O. Geomorphology in arid regions. Proceedings of the eighth annual geomorphology symposium, Binghamton, 1977:115-138.
- [56] SILVA P G, GOY J L, ZACO C, et al. Fault generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic

- and earthquake activity[J]. *Geomorphology*, 2003, 50(1/2/3): 203–226.
- [57] WELLS S G, BULLARD T F, MENGES T M, et al. Regional variations in tectonic geomorphology along segmented convergent plate boundary, pacific coast of costa rica[J]. *Geomorphology*, 1988, 1(3): 239–265.
- [58] 马保起, 李克, 吴卫民, 等. 大青山河谷地貌特征及新构造意义[J]. *地理学报*, 1999, 54(4): 327–334.
- [59] 闫冬冬, 吕胜华, 赵洪壮, 等. 六棱山北麓中段冲沟地貌发育的定量研究及其新构造意义[J]. *地理科学*, 2011, 31(2): 244–250.
- [60] KELLER E A, PINTER N. *Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape* [M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002: 121–185.
- [61] ALIPOOR R, MOHSEN P, MEHDI Z, et al. Active tectonic assessment around Rudbar Lorestan dam site, High Zagros Belt (SW of Iran)[J]. *Geomorphology*, 2011, 128(1/2): 1–14.
- [62] DEHBOZORGI M, POURKHERMANI M, ARIAN, et al. Quantitative analysis of relative tectonic activity in the sarvestan area, central Zagros, Iran[J]. *Geomorphology*, 2010, 121(3/4): 329–341.
- [63] PARUL N J, MAURYA D M, CHAMYAL L S. Morphotectonic segmentation and spatial variability of neotectonic activity along the Narmada-Son Fault, Western India: remote sensing and GIS analysis[J]. *Geomorphology*, 2013(180/181): 292–306.
- [64] 常直杨, 王建, 白世彪, 等. 基于DEM的白龙江流域构造活动定量分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 34(2): 292–301.
- [65] PEDRERA A, PEREZ-PENA J V, GALINDO-ZALDIVAR J, et al. Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain)[J]. *Geomorphology*, 2009, 105(3/4): 218–231.
- [66] 刘爱利, 汤国安. 中国地貌基本形态DEM的自动划分研究[J]. *地球信息科学*, 2006, 8(4): 8–14.
- [67] SUNG Q C, CHEN Y C. Self-affinity dimension of topography and its implications in morphotectonics: an example from Taiwan[J]. *Geomorphology*, 2004, 62(3/4): 181–194.
- [68] 孙棱翔, 蔡衡. 八卦山背斜集水区地形计测指标与活动构造意义之探讨[J]. *地理研究*, 2008(49): 123–141.
- [69] FIGUEROA A M, KNOTT J R. Tectonic geomorphology of the southern sierra nevada mountains (California): evidence for uplift and basin formation[J]. *Geomorphology*, 2010, 123(1/2): 34–45.
- [70] ANOOP A, PRASAD S, BASAVAIAH N, et al. Tectonic versus climate influence on landscape evolution: a case study from the upper Spiti valley, NW Himalaya[J]. *Geomorphology*, 2012(145/146): 32–44.
- [71] DELCAILLAU B, LAVILLE E, AMHRAR M. Quaternary evolution of the Marrakech High Atlas and morphotectonic evidence of activity along the Tizi NTest Fault, Morocco[J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4): 262–279.
- [72] VIVEEN W, VAN BALEN R T, SCHOORL J M, et al. Assessment of recent tectonic activity on the NW Iberian Atlantic Margin by means of geomorphic indices and field studies of the Lower Miño River terraces[J]. *Tectonophysics*, 2012(544/545): 13–30.
- [73] ISMAIL E H, ABDELSALAM M G. Morpho-tectonic analysis of the Tekeze River and the Blue Nile drainage systems on the Northwestern Plateau, Ethiopia[J]. *Journal of African earth sciences*, 2012, 69: 34–47.
- [74] PEREZ-PENA J V, AZOR A, AZANON M, et al. Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis[J]. *Geomorphology*, 2010, 119(1/2): 74–87.
- [75] SHAHZAD F, GLOAGUEN R. TecDEM: a matlab based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: drainage network preprocessing and stream profile analysis[J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(2): 250–260.
- [76] SHAHZAD F, GLOAGUEN R. TecDEM: a matlab based toolbox for tectonic geomorphology, Part 2: surface dynamics and basin analysis[J]. *Computers & geosciences*, 2011, 37(2): 261–271.
- [77] PEREZ-PENA J V, AZANON J M, AZOR A. CalHypso: an ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain[J]. *Computers & geosciences*, 2009, 35(6): 1 214–1 223.

[责任编辑: 丁 蓉]