

DEM数据在青藏高原地貌研究中的应用

高明星, 刘少峰

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:近年来,青藏高原一直是国际及国内地质学界极其关注的地区。随着遥感技术的发展,基于DEM的地表过程分析给青藏高原研究带来了崭新的思路和方法。本文回顾了应用DEM数据进行青藏高原地貌研究的历史,通过分析其应用研究的几个阶段,总结了DEM技术在高原上的研究技术,阐述了DEM数据在各学科中的交叉应用,指出研究方法上的系统化、信息的进一步挖掘和高精度数据源获取是该领域发展的主要任务,并展望了DEM在地貌研究中的发展方向。

关键词:青藏高原; 数字高程模型; 构造地貌; 遥感

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2008)01-0059-05

0 引言

青藏高原多样的地貌地质现象记录了丰富的高原隆升和演化的动态信息,被誉为影响全球气候变化的“第三极”和解决大陆动力学研究的最佳野外实验室和揭开地球奥秘的金钥匙,因而倍受世界地质学界重视。近年来,青藏高原的研究取得了瞩目的成果^[1-4],大有形成一门新学科——青藏高原学的趋势^[5]。然而,青藏高原由于其独特的自然地理条件,高寒缺氧,生活工作条件极其恶劣,交通条件很差,给地质调查工作带来很大困难,很多地点因人无法到达而影响了调查的精度。遥感地质调查则不受上述条件的限制,以遥感数据为信息源获取地貌信息,结合已知的地质资料进行GIS分析、地质信息挖掘,并与野外地形地貌调查相结合,是一种实用、快速、有效的方法。

利用卫星遥感影像数据在青藏高原开展的研究已经在地质填图、冰雪监测及生态环境调查等各个领域^[6-9]取得了较多成果,然而应用数字高程模型(DEM, Digital Elevation Model)数据在高原上开展研究是一项新的方向。近年来,随着航空遥感技术的发展,越来越多的学者采用DEM数据在青藏高原开展研究并取得了重要的探索性成果。例如国内一些学者应用美国航空局2003年正式发布的SRTM DEM数据揭示青藏高原内外流区域的地貌特征并做了夷平面的相关讨论^[10-13]; 国外Fielding等人对

青藏高原进行过大尺度地貌分析^[14,15], Chris Duncan等人在喜马拉雅弧形碰撞带对尼泊尔和不丹境内的局部地形起伏、坡度等进行了分析和对比^[16]。这些研究主要进行了大尺度的地貌分析以及相关地貌参数的获取,为探讨地貌学与遥感科学相结合的研究奠定了基础,而更深入的研究则有待于高精度DEM数据的获取及其在分析方法上的改进与提高。本文介绍了DEM数据在青藏高原地貌领域的研究应用,总结了主要的技术方法,通过归纳、对比国内外同行的研究成果,对应用DEM数据在青藏高原地貌研究的发展方向进行了展望。

1 DEM数据

数字高程模型DEM由麻省理工学院Chaires. L. Miller教授于1956年首次提出,它是地球自然表面高程的数字表示^[17]。DEM数据由于其数据形式的多样性及应用领域的广泛性,为地貌研究、地表、大气以及深部动力学机制之间的联系研究提供了新的手段。数字高程模型DEM是表示区域 D 上地形的三维向量有限序列^[18]。

$$V_i = (X_i, Y_i, Z_i) \quad (1)$$

式中 $(X_i, Y_i) \in D$, 是平面坐标; Z_i 是 (X_i, Y_i) 对应的高程, $i = 1, 2, \dots, n$ 。其数据类型一般有矢量型(等高线)、栅格型和不规则三角网TIN (Triangulated Irregular Network) 3种,如图1^[18,19]所示:

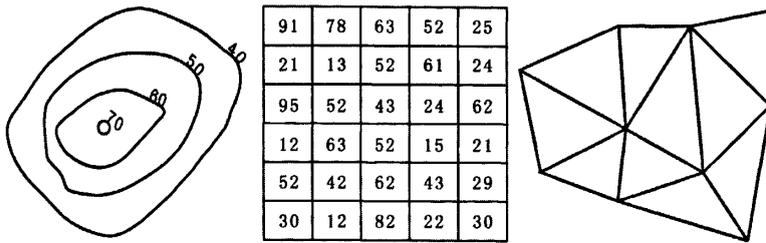


图1 数字高程模型等高线、栅格和不规则三角网

数字高程数据的获取主要有以下2种手段：一是地形图数据,是实地测绘或航空摄影测量的结果,含有制图误差、纸张变形及印刷误差等;另一种是利用航天遥感立体相对采集的高程数据,如法国的SPOT、日本的ALOS以及雷达传感器获取的数据(如干涉孔径雷达DInSAR数据以及德国在2007年年初将发射的TerraSAR-X雷达卫星影像)等。航空遥感数据由于成本较高,在高原的研究工作很少被使用。

2 DEM在青藏高原地貌研究中的应用

自DEM数据出现后,三维地形可视化一直是应用最为广泛的技术,早期由于其数据获取的方式和精度不能完全满足深入的研究需求,并未涉及数据挖掘以及和其它学科的交叉研究。随着DEM分析技术的发展成熟以及一些大比例尺航空遥感数据的获得,数据空间分辨率不断增高,使得在宏观及微观尺度都能进行定量化研究,可对地貌参数进行定量化计算,并且已在探讨地表、大气以及深部的动力学机制之间的联系等领域有了许多研究。将DEM与地层、区域构造填图等资料相结合,DEM提供的地形信息能够为地表地质作用过程研究提供更快速、有效的途径。DEM数据在高原地貌研究中的应用技术总结如图2所示。

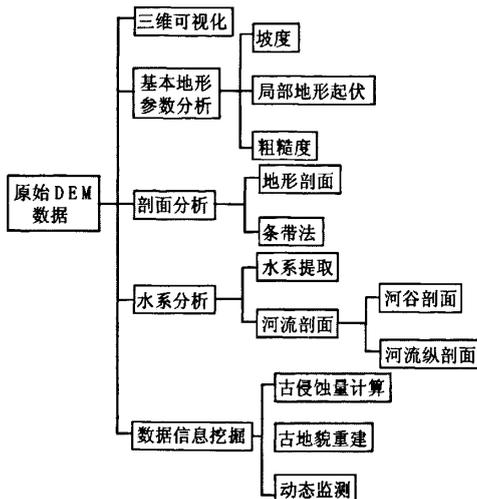


图2 DEM数据在青藏高原地貌研究中的主要技术方法

2.1 地形三维可视化应用

DEM是数字地形模型(Digital Terrain Model,简称DTM)的一个分支,最初是为了高速公路的自动设计提出来的,后来被用于面积、体积、坡度计算以及任意两点间的通视判断和任意断面图绘制等等^[20]。早期由于受到研究方法和数据源的限制,虽然采用等高线数据做研究的较多,但等高线密度不均,传统手工制的纸质地图形成,精度较低且误差大,尽管能大体反映在高程变化上的趋势,但高程值的精度很低,所以研究上只停留在宏观尺度地形揭示方面,主要应用于地形三维可视化及景观描述等。如曾钱帮^[21]等在川藏公路典型路段做了地形三维可视化应用于地质灾害研究,其中滑坡和泥石流的发育特点能够在三维地形场景中得到良好的反映,川藏公路典型路段的三维地形可视化工作作为川藏铁路的选线、绕避不良地质灾害的发生和开凿铁路隧道的位置选择等提供了参考。现今DEM三维可视化的应用技术仍是一种常用的描述地貌宏观形态的手段,并作为辅助其它研究如基础地质研究、地球物理研究等的一项工具^[22]。

利用DEM数据的以地形地貌三维可视化为主的探索性研究不仅为以后的深入研究奠定了基础,也在工程地质勘测中解决了绕避地质灾害等实质性问题。

2.2 地貌参数分析应用

20世纪90年代以来,DEM在各个方面的应用程度进入了一个新的阶段。这个时期应用DEM结合地貌、构造及大气监测等多学科的研究越来越多。在分析方法上主要以呈现大区域的地貌参数描述加上细节上的剖面分析为主^[23]。

Feilding^[14,15]利用DMA(the U.S. Defence Mapping Agency)数据(南北向精度约93 m,东西向精度约78 m),结合当时公开发布的ETOPO5(比DMA的数据精度低约100倍)和DCW发布的等高线数据,对青藏高原以及周边地区,尤其对平坦的高原面做了大尺度地貌分析。主要以以下2种方式揭示地貌参数:

(1)坡度分析。选择适当的窗口(南北280 m,

东西 235 m)提取坡度。高原边缘南部的喜马拉雅造山带,西面的卡拉昆仑和帕米尔及北面的昆仑山起伏较大,高原中部和北部地形起伏小,大部分地区坡度小于 10° 。

(2)地貌面分析。取 100 km 宽的条带,将其最高、平均及最低的点分别连成线,和局部地形起伏图进行对比。从南到北,从西到东分别做了 2 条剖面,将最大高程、最小高程、平均高程、局部地形起伏和年降雨量投到同一个坐标下进行分析。分析提出:青藏高原的剥蚀夷平和造山带的剥蚀有着显著的不同,高原边缘受地形降雨和河流侵蚀影响大;而在高原内部,尽管海拔在 4 000~5 000 m,但由于地形宽缓河流的侵蚀并不明显。高原南缘的喜马拉雅从中新世以来最少剥蚀了 25 km,而高原内部并没有明显的剥蚀迹象。现代宽缓的高原面可能是岩石圈内一定深度的粘性流的行为在地表的反映,而不是由于侵蚀所造成的结果。

Duncan^[16]利用 3 弧秒数据(同 Fielding),对比分析了尼泊尔和不丹的各种地貌参数(包括剖面高程及坡度)的变化,结合岩性分析,指出喜马拉雅造山带的地质及地貌在不丹和尼泊尔有很大差异,反映了其构造活动的差异性。

在这一阶段,分析方法上进一步发展,同时 DEM 数据在各个学科的交叉应用促使技术方法不断提高,进一步揭示了地表信息与深部是相互联系的,为地貌、大气以及动力学机制研究奠定了基础,从而使其相关应用研究也上升到了一个新的高度。

2.3 复杂技术综合应用

随着遥感技术的发展和利用卫星获取地表高程影像产品的广泛应用,深入挖掘 DEM 数据信息并结合普通地质学(沉积、构造、地貌)等理论的应用研究,已成为当前的主要方向。同时,技术手段也进一步扩展成熟,如以 DEM 数据为基础,结合野外路线调查及图切构造地貌剖面对青藏高原东北缘祁连山地区典型层状地貌分布发育特征的研究,识别夷平面、多级山足剥蚀面及主要入海水系如黄河及其支流的研究^[24]等。其主要的应用技术如下:

(1)水系分析。STRM 数据的发布标志着 DEM 数据在青藏高原的应用达到了一个新的高度,即航空遥感数据应用期的到来。许多科学家用此数据在世界不同的地区开展研究,在地貌研究中,刘静^[10]等对高原北部及高原内、外流域进行定量地貌分析,表明不同地区在地貌上有明显差异。高原北部河流水系不发育,该区唯一一条大河——黄河,从东部流出高原,而其支流也不是很发育。在青海湖以北和西北的局部地区,海拔在 4 000 m 左右的地区尚未

受到河流的溯源侵蚀,“削高填低”是这个区域平缓的主要因素;高原的腹部地势平坦,与内流水系 4 000~5 000 m 基准面紧密相伴;高原腹部微弱的构造运动也是其中一个因素。另外,还进行流域分析、坡度坡向分析、河流纵剖面分析及河谷各要素定量分析等^[25]。

(2)构造综合分析。DEM 数据在活动构造中也有广泛应用^[26]。李勇^[12]以龙门山作为切入点,通过构造地貌学、数字高程剖面、均衡重力异常、成都盆地最早期大邑砾岩和岷江阶地等方面的研究,探索了该地区河流下蚀速率与山脉的表面隆升、地壳隆升作用之间的耦合关系。张会平^[27]等构建了岷山构造带数字高程模型,初步对岷山构造带,特别是岷山断裂带构造地貌特征进行了分析,通过坡度、坡向以及地形起伏度和高程的统计分析,得出了岷山地区夷平面及山顶面的分布特点。陈正位^[28,29]等利用 15 m 分辨率的 ETM+ 遥感影像和 20 m 分辨率的 DEM 数据,结合野外地质考察,重点研究了该断裂的详细结构和晚第四纪以来的活动习性。在这些研究中,DEM 数据被用于断层总体结构分析和区域地貌分析,通过解译 DEM 生成的地貌阴影图,了解地貌概况和断裂展布概况,通过地形剖面分析,对微地貌进行定量分析,进而对断错位移进行估算。

(3)古沉积面恢复。恢复新生代古盆地沉积顶面的 DEM,确定其顶面地质年代,有利于分析研究区盆地沉积之后的区域宏观变形样式和变形机制,是进行地表过程研究的有效方法之一。由于无法获得空间分布中所有沉积点数据,地表获得典型时期的古沉积露头反映了古沉积面空间分布的部分特征,可通过数值插值计算预测未知区域的特征。作者根据地表典型时期的沉积露头,恢复了青藏高原东北端特定时期(渐新世到中新世早期)的古充填面(见插图彩片 12),渐新统古沉积顶面 DEM 形成了近北西南东向的隆起和拗陷,主要有贵德—尖扎—循化拗陷、西宁—平安—民和—一定西—秦安拗陷、六盘山山前固原—同心拗陷、西秦岭北缘隆起、拉鸡山隆起及六盘山隆起等。这些隆起和拗陷显然是渐新统沉积后变形的产物,地质研究表明在渐新统的同沉积期,东北端发育受西秦岭北缘逆冲断层控制的大型前陆盆地,之后逆冲带前展迁移,扩展至六盘山,致使早期盆地地层卷入变形。据古沉积面恢复结果,渐新统变形在拉鸡山地区强烈,形成隆拗相间的结构特点,而民和—一定西以北地区变形宽缓,变形弱,仅在六盘山地区形成逆冲隆升峰带,揭示了该区从渐新世以来所经历的隆升变形,为青藏高原研究提供了沉积、构造地貌方面的信息。

(4) 古侵蚀量计算。区域侵蚀量的计算对于分析区域地表过程有着重要的意义。区域性切割量和分布可以通过将恢复盆地充填面的 DEM 减去现代 DEM 获得^[30]。正值代表岩石已被侵蚀,零值表示无侵蚀,负值表示现代地形高于恢复的沉积顶面。由于负值区往往为山峰,它们可能从未被沉积物覆盖,也有可能沉积后被剥蚀殆尽,因此,一般将负值转为零值,如插图影片 13 所示。选定高原东北缘陇西盆地地区的中新统一上新统地层露头作为古地貌形态恢复研究的地貌标志,并以此古地貌形态面为区域基准面,实现青藏高原东北缘地区更新世古地形面恢复以及侵蚀量的定量化分析研究。

(5) 动态监测。在遥感图像处理手段上,多个传感器的融合已成为 DEM 数据应用的发展方向之一,融合后的数据信息更全面,并能最大程度降低低精度数据的形变。有研究人员将 ASTER 数据和 SRTM 3 数据进行融合,并用融合数据对喜马拉雅南坡冰川的动力学和结构信息进行研究,分析了坡度和冰川滑动速率的关系,以及与湖泊形成的范围的关系^[31-33]。

利用遥感数据进行地貌研究与构造气候相结合讨论是大地构造学的前沿课题。地球表面是一个重要的、由地球内部原因引起的大地构造过程的信息源,地表过程是大地构造和气候的响应,地表地形是地壳形变和气候演化等过程的标志性载体。现阶段 DEM 数据精度越来越高,提供的信息也越来越丰富,为研究者解决问题提供了保障。对于青藏高原特殊的地貌条件,DEM 结合其它遥感数据和野外工作能达到事半功倍的效果。但是 DEM 研究需要进一步理论化、系统化,同时多个传感器数据融合技术有待继续探索,数据挖掘程度有待于深入。

3 结论与展望

利用 DEM 数据对青藏高原进行研究是一个相对新的领域。随着遥感技术、高性能计算机及数字图像处理技术的不断发展和应用,DEM 数据采集的技术已基本成熟,相应的软件也不断涌现。

(1) 作为一种反映地面高程的信息源,数字高程模型不仅能完成一般的地图制图、三维模拟与简单的地形要素提取,更可望通过数据挖掘,获得能反映基本地理规律的深层次的地质学信息。在青藏高原开展的一系列研究已经取得的初步成果,显示了基于 DEM 的数字地形分析法已经成为一种崭新的地质研究方法。

(2) 利用 DEM 数据,进行青藏高原构造地貌研

究以地面形态研究,深入研究青藏高原地貌特征,可以为典型地区的地表过程以及隆升、反馈机制的研究提供一个崭新的视角。

(3) 基于 DEM 的数字地形分析在技术上还有诸多需亟待解决的问题,如系统地研究方法尚未形成、更高精度传感器的开发及其图像的获取等。随着技术的发展,DEM 应用可望实现青藏高原研究重要理论与方法的突破。

参考文献:

- [1] England P C, Houseman G A. Finite Strain Calculations of Continental Deformation: Comparison with the India - Asia Collision Zone[J]. *Journal of Geophysics*, 1986, (91):3664 - 3676.
- [2] Molnar P, England P, et al. Mantle Dynamics, Uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31:357 - 396.
- [3] Wu Lingling, Youngsook Huh R, Qin Jianhua, et al. Chemical Weathering in the Upper Huang He (Yellow River) draining the Eastern Qinghai - Tibet Plateau[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(22): 5279 - 5294.
- [4] Fang Xiaomin, Yan Naodu, Rob Van der Voo, et al. Late Cenozoic Deformation and Uplift of the NE Tibetan Plateau: Evidence from High - resolution Magnetostratigraphy of the Guide Basin[J]. *China GSA Bulletin*, 2005, 1208 - 1224.
- [5] 于学政. 青藏高原遥感信息地质含义——兼论东昆仑金矿成矿远景[J]. *国土资源遥感*, 1999, (1): 63.
- [6] Li Zhen, Sun Wenxin, Zeng Qunzhu. Measurements of Glacier Variation in the Tibetan Plateau Using Landsat Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 63(3): 258 - 264.
- [7] 张洪恩, 施建成, 刘素红. 湖泊亚像元填图算法研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(3): 376 - 377.
- [8] 周才平, 欧阳华, 王勤学. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算[J]. *地理学报*, 2004, 59(1): 74 - 78.
- [9] Fu Bihong, Yasuo Awata. Displacement and Timing of Left - lateral Faulting in the Kunlun Fault Zone, Northern Tibet, Inferred from Geologic and Geomorphic Features [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(2 - 3): 253 - 265.
- [10] 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“真平面”的讨论[J]. *地学前缘*, 2006, 13(4): 285 - 299.
- [11] 张会平. 青藏高原东缘、东北缘典型地区晚新生代地貌过程研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2006.
- [12] 李 勇. 青藏高原东缘晚新生代河流下蚀作用与隆升作用之间的耦合关系研究[D]. 成都:四川大学, 2004.
- [13] 张会平, 杨 农, 张岳桥. 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 - 133.
- [14] Fielding E J. How Flat is Tibet? [J]. *Geology*, 1994, 22:163 - 167.
- [15] Fielding E J. Tectonic Geomorphology of Tibet and the Himalaya Using High - resolution Digital Topography from Interferometric Analysis of Shuttle Radar Imagery Abstracts with Programs - Geological Society of America[A]. *Geological Society of America 28th Annual Meeting*[C]. 1996.

[16] Duncan Chris, Masek Jeff. How Steep are the Himalaya? Characteristics and Implications of Along - strike Topographic Variations [J]. *Geology* January, 2003, 31(1): 75 - 78.

[17] Summerfield M A. *Geomorphology and Global Tectonics* [M]. London: John Wiley & Sons, Ltd. Press, 1999.

[18] 李志林,朱 庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000.

[19] 刘少峰,王 陶,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): 661.

[20] 张根寿. *现代地貌学*[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[21] 曾钱帮, 刘大安, 马占海,等. 地形三维可视化在川藏公路典型路段中的应用[J]. *工程地质学报*, 2006, (4): 518 - 521.

[22] Kapp P, Guynn J H, Indian Punch Rifts Tibet [J]. *Geology*, 2004, 32: 993 - 996.

[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(40): 391 - 398.

[24] 顾延生,张旺生,朱云海,等. 祁连山东南缘基于 RGMAP 的数字化地貌研究[J]. *地球科学*, 2003, 28(4): 395 - 398.

[25] Tim J Wright, Barry Parsons, Philip C, et al. InSAR Observations of Low Slip Rates on the Major Faults of Western Tibet [J]. *Science*, 2004, 305(5681): 236 - 239.

[26] Fielding E J, Werner C L, Farr T C, et al. High - resolution DEMs of the Altyn Tagh Fault in the Kunlun of Tibet by Interferometric Processing of SIR - C and ERS - 1 SAR Abstracts with Programs [A]. *Geological Society of America 27th Annual Meeting* [C]. 1995.

[27] 张会平, 杨 农, 张岳桥,等. 基于 DEM 的岷山构造带地貌初步研究[J]. *国土资源遥感*, 2004, (4): 54 - 58.

[28] 陈正位,谢 平,申旭辉,等. 藏南宁金抗沙西麓断裂晚第四纪活动特征[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(1): 118 - 125.

[29] 陈正位, 申旭辉, 曹忠权. 基于数字高程模型对亚东 - 谷露构造带第四纪活动习性的研究[J]. *地震*, 2004, 24: 41 - 45.

[30] Burbank D W. *Tectonic Geomorphology*[M]. Blackwell Science, 2001.

[31] Quincey D J, Richardson S D. Early Recognition of Glacial Lake Hazards in the Himalaya Using Remote Sensing Datasets [J]. *Global and Planetary*, 2007, 56(1 - 2), 137 - 152.

[32] Kööb A. Combination of SRTM 3 and Repeat, ASTER Data for Deriving Alpine Glacier Flow Velocities in the Bhutan Himalaya [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94: 463 - 474.

[33] Thomas P Albright, Thomas H Painter, Dar A Roberts, et al. Classification of Surface Types Using SIR - C/X - SAR, Mount Everest Area, Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(E11): 823 - 837.

THE APPLICATION OF DEM DATA TO THE STUDY OF TIBET PLATEAU

GAO Ming - xing, LIU Shao - feng

(Department of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In recent years, many researchers have been involved in the study of Tibet plateau. The development of the remote sensing technology and more and more sophisticated DEM - based analytical methods has provided researchers with a new means for studying Tibet plateau. This paper has briefly reviewed the history of applying DEM data to the study of Tibet plateau. Based on studying several stages in using DEM data, the authors analyzed the methods for data fusion of multi - sensor and the application of DEM data in many fields. It is pointed out that the systematization of the research method, the deep extraction of information and the acquiring of high - precise data seem to be the main tasks in future researches of this field. The problems that should be solved in future are also discussed.

Key words: Tibet plateau; DEM; Tectonic geomorphology; Remote sensing

第一作者简介: 高明星(1981 -),女,博士,主要从事青藏高原构造地貌的研究。

(责任编辑: 李 瑜)

=====

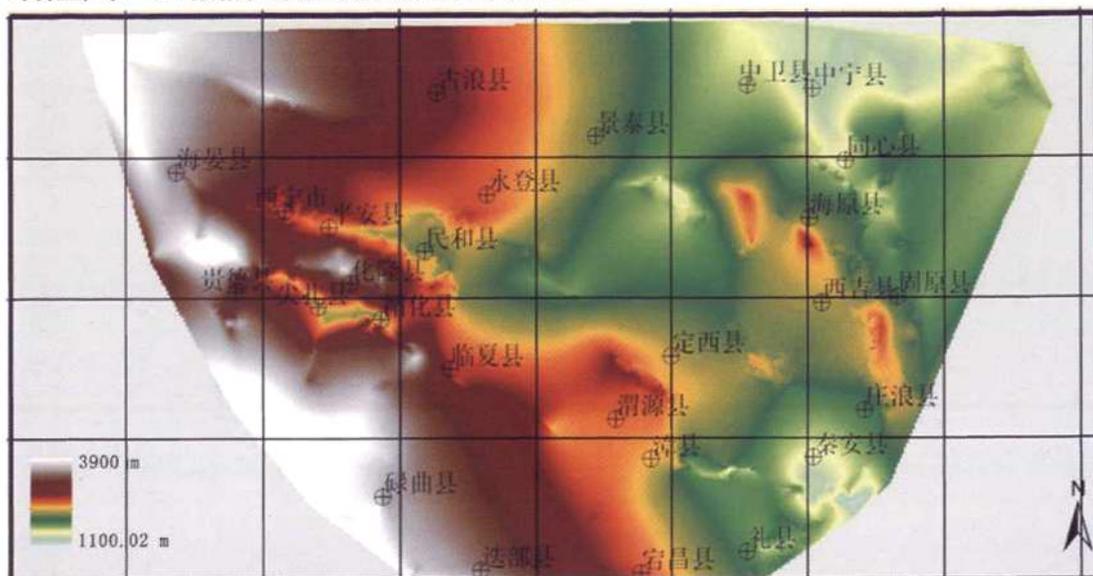
(上接第 22 页)

BP and RBF can perform well in geometric rectification of remote sensing imagery and reach higher accuracy than the Collinearity Equation Model. Besides, the neural network can eliminate the influence of GCPs with gross error, and hence can better improve the efficiency.

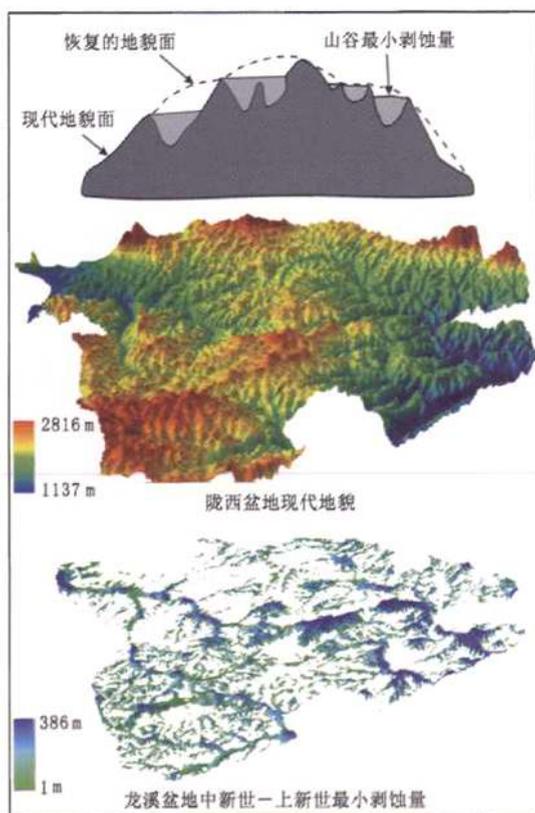
Key words: Neural network; Geometric rectification; Collinearity equation model

作者简介: 栾庆祖(1981 -),男,硕士研究生,主要研究方向为遥感影像信息提取、遥感与 GIS 应用; 刘慧平(1963 -),女,教授,主要从事遥感和 GIS 在资源环境中的应用研究。

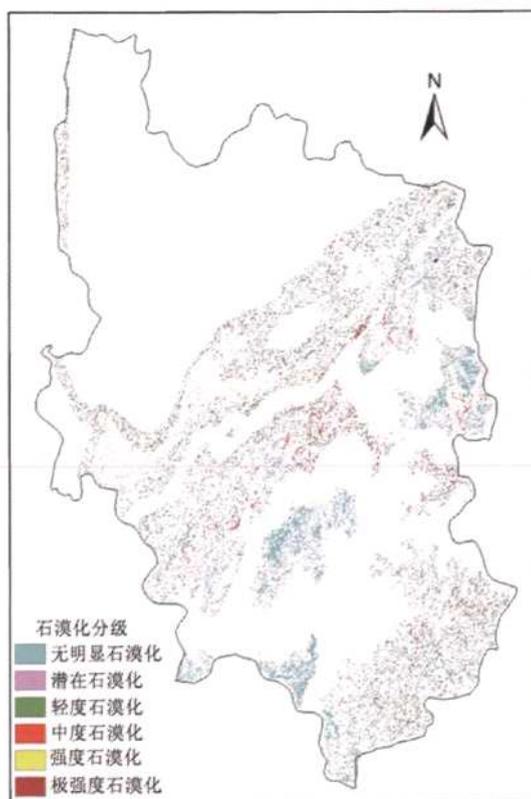
(责任编辑: 刁淑娟)



彩片12 青藏高原东北端典型时期古充填面恢复图



彩片13 DEM计算区域侵蚀量图—以陇西盆地为例



彩片14 南川市石漠化强度分级图

(彩片14见黄岩一文)