

梁朋, 田勤俭, 苏鹏, 王林, 李文巧, 胡朝忠, 2015. 利用 DEM 技术自动提取龙门山南段青衣江阶地地面的研究. 震灾防御技术, 10 (2): 240—252. doi: 10.11899/zzyfy20150204

利用 DEM 技术自动提取龙门山南段 青衣江阶地地面的研究¹

梁朋 田勤俭 苏鹏 王林 李文巧 胡朝忠

(中国地震局地震预测重点实验室, 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要 河流阶地地面是一种时间性、连续性非常高的层状地貌面, 利用跨断层地区的河流阶地变形可以定量地判别一个地区的断层活动性。青衣江横跨龙门山断裂带南段是一条区域性大河, 由于龙门山南段构造活动强烈且河流阶地被侵蚀程度严重, 为了在室内更好、更快地解译青衣江河流阶地, 使野外调查工作更具有针对性, 本文在龙门山南段青衣江流域小关子至飞仙村一段, 采用航测遥感技术制作的 2m 分辨率 DEM 和 1/5 万数字高程模型, 基于 ArcGIS 和 MATLAB 平台进行了阶地地面提取和聚类分析, 以模拟野外测量阶地的流程, 试图通过计算机提取, 快速获取该地区更多的残余地貌面, 建立起较为完整的河流阶地纵剖面。研究表明: 野外测量数据与计算机自动提取结果相似度较高, 具有较好的一致性; 在完整的阶地剖面中发现了芦山盆地内部阶地具有疑似拱曲现象; 在大川-双石断裂附近阶地有翘起现象, 推测芦山盆地西缘阶地拱曲是由大川-双石断裂东侧的一条未知断层引起的, 大川-双石断裂附近阶地的翘起现象可能是在断层逆冲推覆过程中形成的, 同时结合区域年代历史数据, 推测该地区(芦山盆地至大川-双石断裂)至少在晚更新世曾发生过构造活动。

关键词: 河流阶地 计算机提取 青衣江 GIS DEM

引言

层状地貌面包括夷平面、剥蚀面和河流阶地, 层状地貌面记录了地区地貌的演化历程, 因此可以用残存的层状地貌面来反演地区的构造活动、气候活动等内外动力演化的过程(潘保田等, 2000; 黄映聪, 2006)。层状地貌面广泛存在, 而且具有年代的意义, 一个层状地貌面就代表一个时代, 是地貌学上的“地层”标志(崔之久等, 1996)。这种特点不仅可以指示比较大范围内的构造活动强弱, 而且还大大拓展了研究地区构造活动的时间尺度。

伴随着断层的活动, 地表上的河流阶地会随之发生变形。用河流阶地作为标志物来获取

1 基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项“芦山地震震构造及区域地震危险性研究”(2013IES010101)、中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项“龙门山断裂带南段断裂活动、古地震与地震构造研究”(2014IES010104)和科技部国际合作计划项目“板内强震发生模型与天地一体化监测预测技术”(2012DFR20440)、“高分遥感地震监测与应急应用示范系统”(31-Y30B09-9001-13/15)共同资助

[收稿日期] 2014-09-11

[作者简介] 梁朋, 男, 生于 1988 年。2012 年毕业于合肥工业大学地理信息系统专业, 现为 中国地震局地震预测所研究生。主要从事构造地貌研究。E-mail: lipe834357@sina.com

断层位移量和运动模式是一种重要的研究手段。在过去的几十年里，许多学者用河流阶地来研究活动断层，如：杨景春等（1998）通过研究河流阶地的发育及变形情况来反映祁连山北麓的新构造演化特征；Scharer 等（2006）用河流阶地研究喀什地区的活动滑脱褶皱；Hubert 等（2007）利用阶地变形讨论了南天山断弯褶皱的活动机制；田勤俭等（2009）研究了汶川地区的阶地与地震的关系，并以此为基础探讨了汶川地震的复发周期。

当前识别河流阶地的主要方法，首先是在室内遥感图像上完成目视解译和划定靶区，然后再进行野外实地调查。对具有代表性的河流阶地采集年龄样品或者根据阶地沉积结构、砾石风化圈的风化情况、厚度，以及拔河高度等来判定河流阶地的级次（李勇等，2005；张世民等，2010）。而且大多只是采用低级河流阶地来研究地区的构造活动（李涛等，2011；李康等，2013），产生这种困境的主要原因是受限于高级层状地貌面的获取（层状地貌面的年代和空间参数）（张军龙等，2013）。因此，如何构建完整的层状地貌面已成为构造地貌研究中亟待解决的问题。

随着高分遥感技术（InSAR、LiDAR 等）的发展，精确高效获取精细地貌形态有了新的解决方案。例如：刘静等（2013）和陈涛等（2014）基于海原断裂带 LiDAR 扫描实验项目，展示了 LiDAR 高分辨率遥感在微构造地貌研究中的潜力。如何利用高分辨率数据获取目标信息，Drăguț 等（2006）、Qin 等（2009）和 Mulder 等（2011）相继开展了很多利用 DEM 提取典型地貌特征的研究，但是利用高分辨率的遥感影像和 DEM 提取河流阶地的研究目前还很少。龙门山构造带南段的芦山地区，其构造活动强烈而且地貌面被严重侵蚀，阶地发育较差，阶地面较小，DEM 高程-像元值曲线不能完全地分辨出各级阶地（宫会玲等，2008）。同时阶地面被大量冲沟、尤其是高阶地切割。张军龙等（2013）认为，阶地剖面线是确定阶地面级别的一种方法，其中确定剖面线的位置是关键，而在切割较为严重的地区，误差会增大。

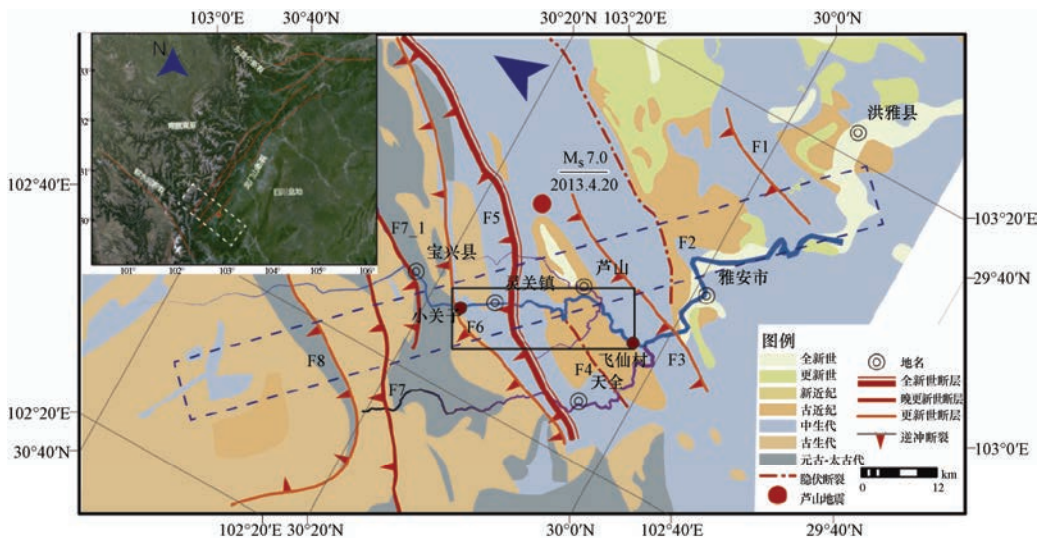
本文的研究区位于龙门山断裂带南段，该段构造活动强烈而且地貌面被严重侵蚀，河流阶地发育较差，晚第四纪遗迹不易保存，但阶地变形对研究该地区断裂活动形态具有非常大的帮助。为了在室内更好更快地完成解译河流阶地及辅助野外工作，使野外工作更具有针对性，本文选取横穿龙门山断裂带南段的一条区域性大河——青衣江，试图通过一种新的方法对中高分辨率 DEM 进行处理，获取青衣江的小关子—飞仙村段河流阶地的分布图和阶地纵剖面图，并通过计算机提取的阶地纵剖面图识别该地区的阶地变形特征。

1 龙门山南段地质概况

2013 年 4 月芦山地区发生了 7.0 级地震，这是继汶川 8.0 级大地震后在龙门山断裂带上发生的又一次地震。许多学者对这次地震的成因给出了不同的解释，例如：徐锡伟等（2013）根据地表破裂、余震空间分布和震源机制解，推断芦山地震由地下隐伏断层引起；李传友等（2013）通过对芦山地震重灾区的调查并未发现地表破裂带，由此认为地震的发震构造是芦山盆地下面的龙门山山前滑脱带，而新开店断裂和大川-双石断裂的微弱活动是滑脱带运动引起的；Chen 等（2013；2014）通过对芦山地震重灾区的调查及古地震的考察后认为，龙门山断裂带南段的活动性与中段存在显著差异，其晚第四纪活动可能已向东侧盆地前展。芦山地震和汶川地震虽然发生在同一构造带上，但二者的震源破裂单元并非一体，汶川地震的发震构造为中央-前山断裂系，芦山地震的发震构造主要与前山-山前断裂密切相关，而与中央断裂关系不明显。

龙门山断裂带位于四川盆地西缘, 走向为北东-南西方向, 长约 500km, 处于中国东西部构造地貌陡变带上。它分隔了松潘-甘孜造山带和扬子克拉通, 东北端与秦岭断裂带交汇, 西南端与鲜水河断裂带相交。在龙门山南段, 龙门山断裂带主要由后山陇东-耿达断裂、中央盐井-五龙断裂、前山大川-双石断裂和山前隐伏断裂组成。龙门山后山带主要为变质岩系和杂岩体构成的冲断掩覆体, 显示为厚皮冲断构造, 表现为密集的、紧闭的构造岩片; 而龙门山前山带由北东向展布的短轴背斜、向斜和逆冲断层组合而成, 显示为叠瓦式推覆体和飞来峰构造, 表现为构造岩片 (Burchfiel 等, 1995)。在龙门山南段第四纪盆地和地层不发育, 存在一系列北东向的断层带和弧形冲断层束, 如图 1 所示 (按正北方向逆时针旋转 45° 绘制)。许多学者对该段的断裂活动年代及特征进行了研究。例如: 杨晓平等 (1999) 利用探槽中地层的错断和地层测年技术分析后认为, 中央断裂五龙断裂在错断距今 9 万年左右的冲积层后, 被距今 7.85 万年的坡积层覆盖, 剖面上地层的垂直位移为 0.73m, 大川-双石断裂错断了距今 5.74 万年以来的冲积层, 垂直位移为 1.74m。董绍鹏等 (2008) 通过地质填图、3D 扫描仪等技术推测, 大邑断裂为全新世活动的盲断层。张岳桥等 (2010) 和陈立春等 (2013) 认为, 陇东-耿达断裂所穿过的 T2 阶地并未被错断, T2 形成以来该断裂活动不明显; 五龙地区 T3 阶地面上存在断层槽谷, 疑似为由盐井-五龙断裂活动所致; 在大川-双石断裂上, 断层谷地明显, T1 阶地未被错断。

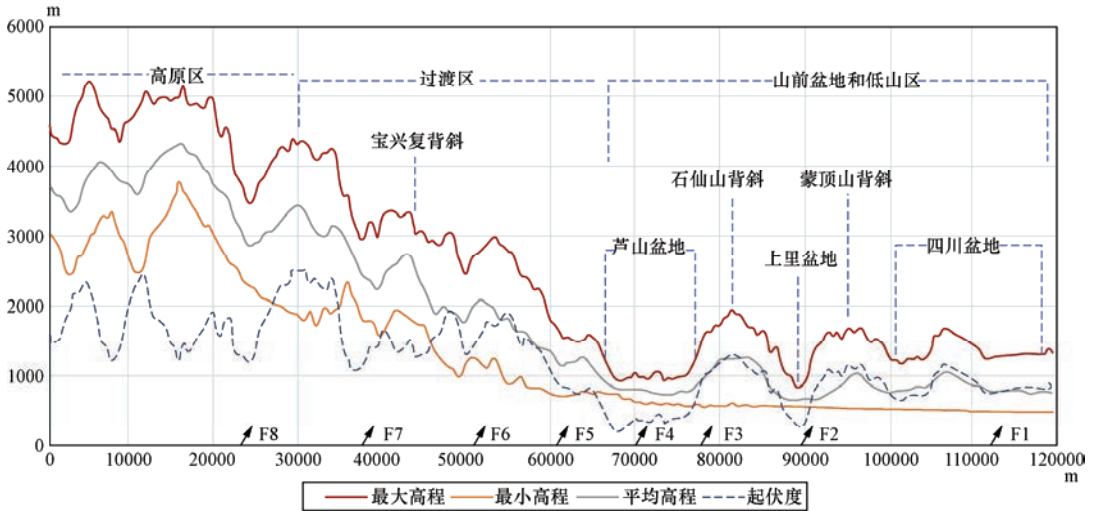
青衣江是穿过龙门山南段的一条区域性大河, 流向为北东-南西向和北西-南东向, 从上游河流形态特征上看, 它可能受控于龙门山断裂带内的推覆和褶皱活动 (贾营营等, 2010)。自中更新世以来, 在青衣江流域至少发育了 6 个阶地, 其主要受构造的制约, 阶地类型主要表现为基座阶地 (唐熊等, 2009)。青衣江流域的地貌在西部主要表现为中高山区; 在东部主要表现为盆地和褶皱; 东部和西部的高差在 4000m 左右 (图 2)。



黑色矩形框内为研究区域; 蓝色虚线框为地形带状剖面图范围; 白色虚线框为地质构造图范围。
F1 为新津断裂; F2 为蒙泉院断裂; F3 为新开店断裂; F4 为始阳-思经断裂; F5 为大川-双石断裂;
F6 为小关子断裂; F7_1 为五龙断裂分支; F7 为五龙断裂分支; F8 为陇东-耿达断裂

图 1 龙门山南段地质构造图

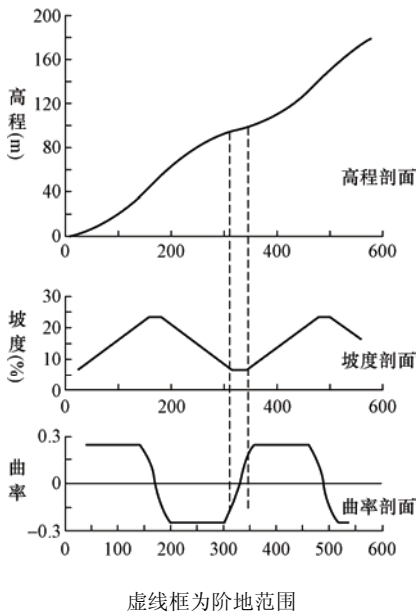
Fig. 1 Simplified geological map of the southern Longmenshan



条带剖面的走向为北西向，与断裂走向近似垂直，F1—F8 分别对应新津断裂、蒙泉院断裂、新开店断裂、始阳-思经断裂、大川-双石断裂、小关子断裂、五龙断裂、陇东-耿达断裂

图 2 龙门山南段地形条带剖面图

Fig. 2 Topographic swath profiles of the southern Longmenshan



虚线框为阶地范围

图 3 地形剖面中曲率与坡度的变化关系 (Demoulin 等, 2007)

Fig. 3 Relationship of slope and curvature in a terrain profile (after Demoulin et al., 2007)

2 河流阶地的自动识别与提取

2.1 阶地提取的原则和假设

原始河流阶地一般有以下特点：①坡度小；②起伏小；③在较长距离内，每一级河流阶地的拔河高度变化范围不大。在地貌的演化过程中，阶地的前缘剥蚀比沉积强，而阶地的后缘更多的是由沉积作用形成的。同一级阶地在不同地区的阶地面沉积或侵蚀的速率也不一定相同，从而导致了同一级阶地面顶部高度发生波动。虽然利用 DEM 提取阶地面顶部高程时会忽略阶地的同沉积不一致的问题，但是从另一个角度看，该方法却有着巨大的优势，因为目前还没有哪一种方法能确定阶地基座是不是规则的 (Demoulin 等, 2007)。

阶地面识别主要是利用地表的坡度和曲率。在坡度发生改变的地方，其曲率也会发生变化；坡度变化越快的地方，其曲率变化也越大 (图 3)。当然，也可采用地表粗糙度

等地貌指数来描述，这些指数虽然含义不同，但是其目的都是为了获取较为平滑的地表表面。采用曲率变化的主要目的为：一是去除沟谷、山脊上的低坡度平面；二是为相邻的阶地提供

一个界限。例如：当针对某个地区的坡度设置过大时，而相邻阶地接触较紧密且阶地间隔较为平缓时，两级阶地可能被划分为同一级，但是曲率在边界的地方会变化很大。

为了获取准确的阶地纵剖面，笔者假设在不受断层强烈影响的一段范围内，阶地的拔河高度是相似的且没有级跃，其目的是为了消除在进行阶地级次划分时产生的影响。

2.2 采用的数据

利用 DEM 提取河流阶地时，最重要的是确认 DEM 分辨率的高低。而针对不同地区阶地的发育情况，对 DEM 分辨率的要求可以有所区别。

由于沿青衣江在小关子至灵关一段，阶地发育较差，所以在进行阶地自动提取时，对该段 DEM 分辨率要求较高。当中低分辨率 DEM 和遥感影像达不到要求时，可采用航空摄影测量获取的高精度的 DEM 和遥感图像，这对识别活动构造是至关重要的（陈桂华等，2006）。考虑到航空摄影测量技术在我国已经发展多年，其与卫星遥感影像相比，航拍影像有更高的清晰度和分辨率，且实时性和自主性更强的特点，所以在本项目实施外业数据采集时，采用的是 POS 辅助航空摄影方案。该方案以运 12 为航空平台，搭载了国产 SWDC-4 真彩数码航空摄影仪用以获取航片。

由于数字航照相机的 GPS 天线相位中心、IMU 几何中心及相机的投影中心不重合，为了获取航片中含有的偏心角和偏心线元素分量偏移值，还需要布设检校场以获取数字航摄相机与 POS 之间的安置关系。另外为了获取飞机移动站的坐标值，在地面还布设了多套 GPS 基站，并采用 GPS 载波相位测量差分定位技术来推算飞机移动站的轨迹。在进行室内数据处理时，基于 RFM、多基线、多重匹配技术提取高精度 DEM 和航空遥感影像，并要求在 WGS84 坐标系中 DEM 分辨率为 2m，航空遥感影像分辨率为 0.2m，GPS 校检得到 DEM 最大高程误差为 2m。

由于禾林村至飞仙村（尤其是在思延乡一带）一段阶地较为发育，所以在进行阶地自动提取时，对该段的 DEM 数据分辨率要求较低。笔者利用 1:50000 数字地形图插值生成 DEM，得到的 DEM 分辨率为 10m，由于 1:50000 地形图等高距为 10m，所以两根等高线之间的插值高度误差为 m 级。基于没有控制点的地形图插值结果可能会对一、二级阶地提取结果影响较大，但对拔河几十米的高级阶地提取结果影响却很小。

2.3 数据预处理

没有“汇”（洼地）的数字高程模型 DEM（即无凹陷点 DEM）是获取真实河流剖面的关键。如果存在“汇”，则可能会生成错误的河流剖面。为了获取真实的现今的河流剖面，采用 DEM 填洼是非常好的方法（Schäuble, 2000）。

2.4 河流阶地提取

2.4.1 河流阶地范围的定义

首先要做的是确定提取河流阶地的范围，因为如果范围选取的过大，会把其他河道的阶地包括进去；如果范围选取的过小，阶地又不能完整地识别出来。由于龙门山南段河流阶地大部分为基座阶地或侵蚀阶地，其上部河流相的沉积物较少，因此笔者采取流域限定的方法来限制河流阶地的范围。具体方法为先获取青衣江的整体流域范围，然后再提取青衣江的次级流域范围。考虑到青衣江主河道的阶地通常出现在主河道与支流交叉的部位，并且沿支流方向在支流的上游一段距离内保存的非常完整（Demoulin 等，2007），所以笔者在支流下游设置了一定范围的缓冲区，因为缓冲区内的阶地也同样为主河道的阶地。基于 DEM 解译

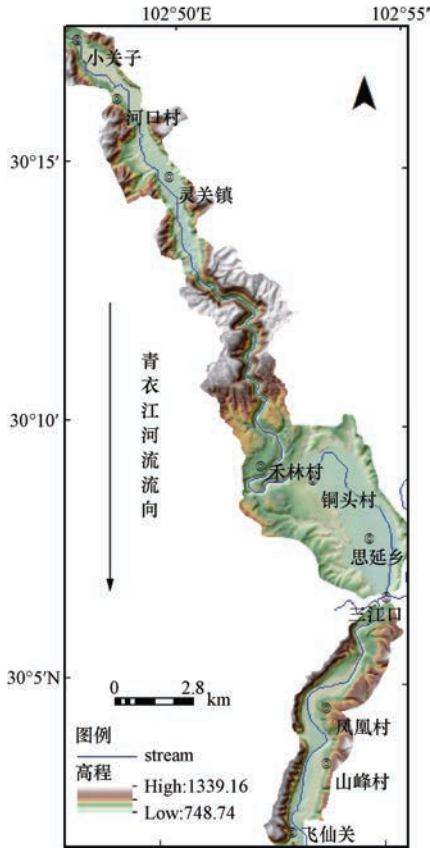


图 4 青衣江主河道阶地提取范围

Fig. 4 The region of extracting terrace

和野外考察的要求，最终确定缓冲区的设置范围为 300m，河流阶地的提取范围为“青衣江整体流域—青衣江次级流域+支流缓冲区部分”，具体如图 4 所示。

2.4.2 疑似河流阶地地面的获取

青衣江河流阶地在不同的地方其发育和被侵蚀的程度是不同的，其主要表现为：在山前地区河流阶地较为发育，并且侵蚀程度较低；而在青衣江进入山区后，河流阶地发育范围较小，被侵蚀的程度很高。所以在识别不同地区河流阶地的时候，笔者根据青衣江不同段的标志阶地的特征设置了不同的参数值。具体方法为：在山前地区河流阶地的坡度范围上限取 8° ，曲率绝对值的范围上限取 0.3；在山区河流阶地的坡度范围上限取 13° ，曲率绝对值的范围上限取 0.5。同时在 ArcGIS 中提取 DEM 的坡度和表面曲率，然后进行栅格叠加用以获取符合上述条件的栅格范围，最终转换为矢量多边形以获取阶地地面的面积。由于在栅格叠加过程中会产生很多小图斑，而这些小图斑有相当一部分位于山脊或冲沟中，它对阶地等级的归类有非常大的影响，为此笔者对小于 $5\text{pixel} \times 5\text{pixel}$ 的小图斑进行了删除。

2.4.3 河流阶地噪音的去除和阶地级次的划定

(1) 首先定义每个阶地地面的代表高度即阶地地面的平均高度，这主要是针对 DEM 无法获取基岩顶面高度的情况，同时根据青衣江河流阶地的实际情况对阶地

地面进行网格化划分，以防止河道突变引起的阶地整体分级误差。

(2) 然后将阶地面垂直投影到青衣江河道上，其投影距离即是每一个阶地面到河道的最近距离。

(3) 将河道划分成 N 段，每段长度相同，具体的长度大小根据实际需求定义，本文中每段河道的长度定义为 400m，这样可建立 400m 长度的“地区阶地综合剖面”。

(4) 在每一个假定的“地区阶地综合剖面”中，会有很多高程相近的阶地面，利用 MATLAB 中的层次聚类函数，可将这些高程相近的面视为同一面进行合并。层次聚类法通过对数据集按照某种方法进行层次分解，直到满足某种条件为止，符合条件的被分为一类。在对每一个综合剖面内部阶地进行合并时，其限定条件为阶地面之间的高差 ΔH 。本文将 ΔH 设置为 10m，经过按以上方法合并之后，可以确定每个“地区阶地综合剖面”内阶地的级数，这样可减少在下一步操作中各级别阶地可能存在重叠性。

(5) 在每一个“地区阶地综合剖面”中会有很多级阶地，这时的阶地剖面可能是不完整的或称之为有“噪音”（如图 5 所示），所以需要每个“地区阶地综合剖面”的阶地级别进行修正。笔者采用的修正方法为，首先将每个“地区阶地综合剖面”投影到一个统一的纵轴上，然后利用 MATLAB 中的 Kmeans 聚类函数，找到每个“地区阶地综合剖面”的各级阶地

对应整个河段的阶地级别和高度。由于使用 Kmeans 聚类函数需要设置初始的分类级别，为此笔者设置了以下两个条件：一是疑似阶地面的高程-面积曲线；二是在进行 Kmeans 计算时设置了不同的阶地分类，并计算每种分类中各级别中心与该级别内阶地面的距离之和，绘制“分级级别-距离和”曲线。对于同一个“地区阶地综合剖面”内有两个或多个同一级别的疑似阶地面时，笔者采用面积占优评估法进行评估，因为 DEM 的高程是地表的高程，尽管可以忽略沉积、侵蚀作用的不一致，但是受地表起伏变化的影响还是很大的，这时仅仅考虑高程的相似性是不合理的，因此笔者认为面积越大，成为阶地的可能性也越大。其中又可分为两种情况，一是其中一个阶地面的面积占绝对优势（例如面积 $A > 5000\text{m}^2$ ），并且是其余阶地面积的几倍，这时可以采用该阶地面的高程作为该“地区阶地综合剖面” T_i 的高程；二是阶地面积不是特别大时，可采用下式进行处理，以淡化小的噪音点的影响。

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

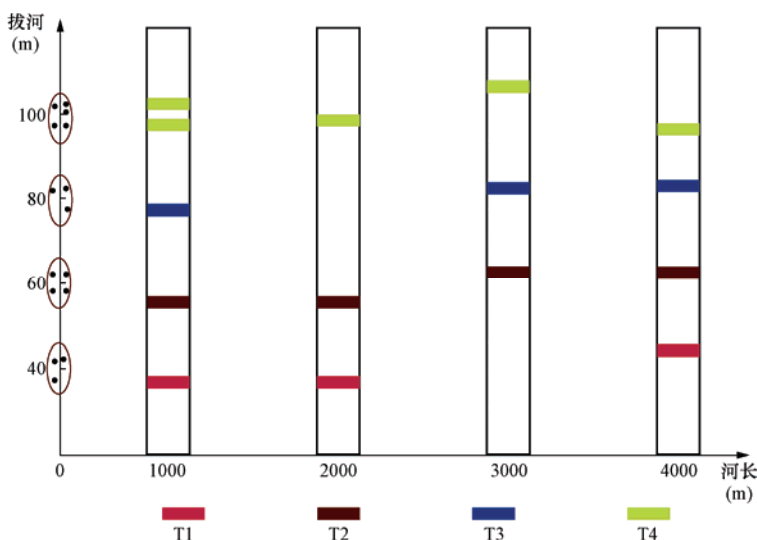


图5 阶地分级原理图

Fig. 5 Principle for terrace classification

(6) 图6为完成上述阶地提取的具体流程。

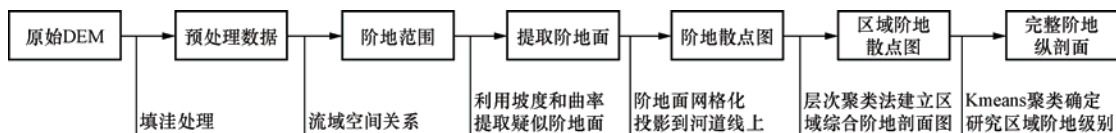


图6 阶地提取流程图

Fig. 6 Flow diagram of extraction terrace

3 结果验证及误差分析

笔者沿青衣江实测了5条阶地横剖面，用以验证利用计算机提取的阶地结果是否可信，

具体数据如表 1 所示。采用野外实测阶地横剖面与计算机提取的阶地横剖面进行对比，评估的标准是两者的相似度，其公式为：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ((A_i - \bar{A}) \times (B_i - \bar{B}))}{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})^2 \times \sum_{i=1}^{i=n} (B_i - \bar{B})^2} \quad (2)$$

式中， \bar{A} 为数据组 A 的平均值； \bar{B} 为数据组 B 的平均值； n 为数据组 A、B 中元素的个数。

表 1 计算机提取的阶地结果与野外实测的阶地结果对比

Table 1 Comparison of automated data and field measurement

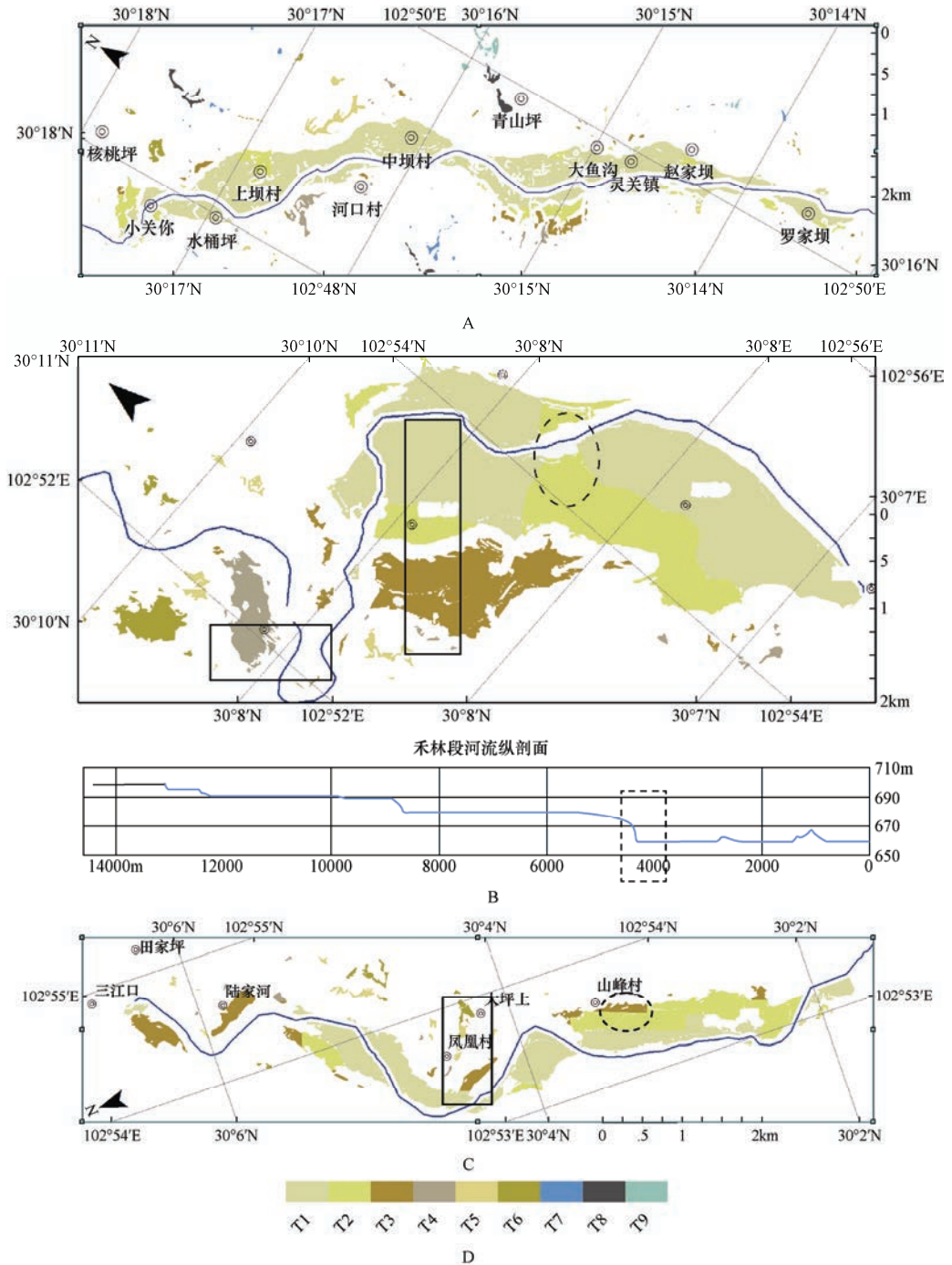
		T1 (m)	T2 (m)	T3 (m)	T4 (m)	T5 (m)	T6 (m)	相似度
凤凰村	计算机提取	6.5	32	40	90	112	168	0.986
	野外实测	4	20	34	80	126	155	
铜头村	计算机提取	6.8	24	74	101	150		0.998
	野外实测	11	30	84	105			
禾林村	计算机提取				109	155	232	0.986
	野外实测			97	125		209	
河口村	计算机提取	8	19	34	73	124	207	0.987
	野外实测	3	17	59	89	126		
大鱼沟	计算机提取	7.5	28	47	99	131	205	0.992
	野外实测	6.5	32	52		157	206	
相似度		-0.392	0.242	0.897	0.762	0.739	0.905	

从表 1 可以看出，野外实测的 5 条阶地剖面与计算机提取的剖面相似度都在 97% 以上；T1—T6 每级阶地的野外测量结果与计算机提取的结果相比，其相似度与阶地的新老有关；由于低级别阶地拔河较低，提取阶地面高度时对数据要求精度较高，所以提取的第一、二级阶地面高度与野外测量的阶地面高度相比，其相似度较低，而高级别阶地的相似度较高。

根据提取的阶地数据分布结果、河流阶地拔河纵剖面和野外验证结果，笔者对出现误差的原因进行了分析。

(1) 地面凹凸不平，低级阶地受人工改造严重。例如：一、二级阶地大多为村庄所在地，房屋等人造建筑物很多，在利用遥感图像合成 DEM 时会造成阶地面的高度增加或降低。

(2) 由于受长期耕种和填洼等生产活动影响，相邻阶地之间的界线不明显。例如：由于受 DEM 分辨率的限制，一、二级阶地之间的阶地坎在某些地方变得不明显，相邻低级别阶地面混合在了一起。这一现象从图 7C 中可以看到，有些地方相邻两级的阶地界线过于整齐，这是因为坡度和曲率两个地貌因子未将两级分开，在网格化后出现的结果；还有图 7C 中椭圆处一、二级阶地边界较为平整，这也是将连在一起的大块阶地网格成小块阶地的后果；同时这种网格化也会把低级别阶地的后缘误分到上一级阶地中，如图 7C 的椭圆处将二级阶地后缘分到了三级阶地。这种误差一般只出现在低级别阶地中。



A 为小关子-罗家坝一带阶地分布图；B 为禾林村-三江口一带阶地分布图；C 为三江口-飞仙村一带阶地分布图；
D 为上述三幅图的阶地图例

在图 A、B、C 中，黑色矩形框为野外阶地测量地点；黑色虚线椭圆表示分类出现误差的地点
注：A、B 图按正北方向逆时针旋转 45° 绘制；C 图按正北方向逆时针旋转 125° 绘制

图 7 阶地分布结果图

Fig. 7 Distribution of terraces from this work

(3) 河流高程获取的准确性，对一、二级阶地影响很大。影响河流高程准确性的因素主要有三个：一是提取河流时产生的误差，例如提取的河道与真实河道有误差；二是河道上存在人工河坝等建筑，河道上如果存在水坝，水坝上游一侧的河面水位会上升，而水坝下游一侧的河面水位会下降，这会导致在河坝上游一段缺失低级河流阶地或阶地的拔河高度突然降低；三是填洼后河流会出现一些陡降，造成阶地提取错误，如图 7B 中的椭圆处，而这些陡降是裂点还是 DEM 本身误差还需进一步查证。

(4) 阶地面高程的准确性。在提取阶地的过程中，通常以每一个阶地面的平均高程代表其真实高程，但是阶地的不规则性以及后期受到的改造，都会使同一级阶地面的坡度、高程等完全不一致，所以会造成阶地面在一定的范围内波动。

(5) 采用坡度和曲率提取的疑似阶地面，不仅包含真正的阶地面，还有因岩性、构造、沟谷等原因产生的低坡度平坦地面，其中沟谷平坦的底部在处理步骤中已经除去，而岩性、构造产生的“假阶地”会混淆在分析的数据之中。

4 结果与讨论

由上述步骤可得到如图 7 所示的青衣江三段的河流阶地分布，以及如图 8 所示的青衣江阶地拔河纵剖面曲线图。下面笔者试图通过野外测量获得的 5 条河流阶地横剖面来验证分类和分级的结果。

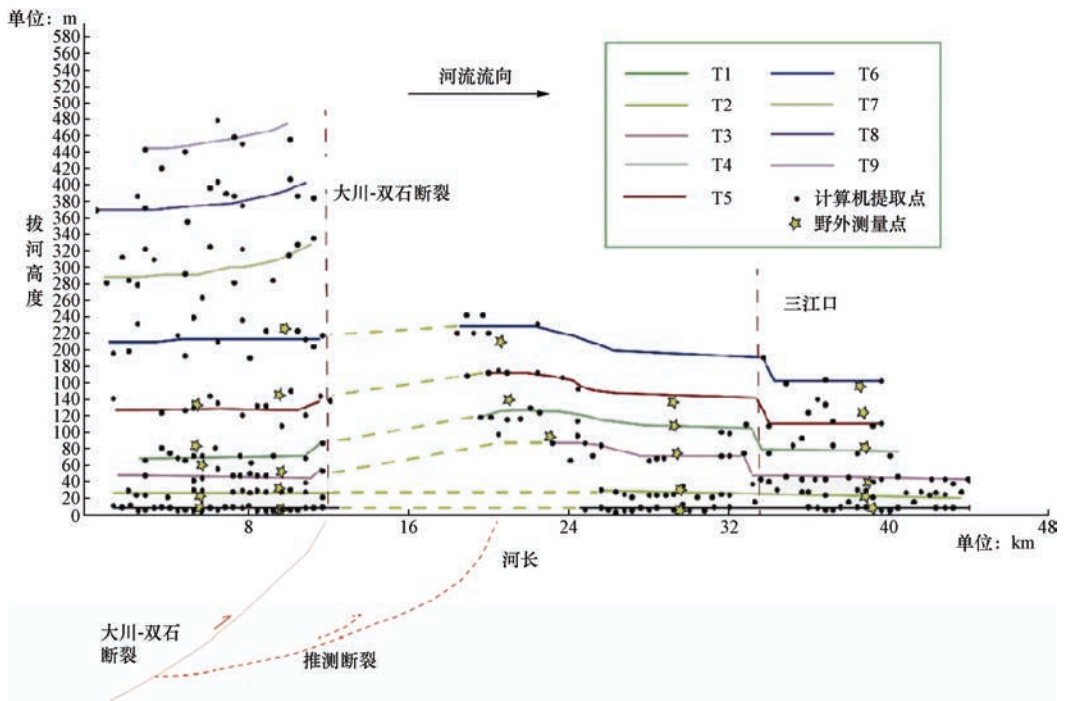


图 8 青衣江阶地相位图

Fig. 8 The longitude profile of terrace in Qingyi River

从图 7 可以明显地看出，一、二级别的阶地面较发育，而其他级别的阶地由于受破坏程度较大，其残余的阶地面较小；在刚穿过峡谷或是河流发生拐弯的地方，阶地面保存较大。

在青衣江的三江口有另外两条支流汇入,造成河流流向由北西转为北东向,在位于石仙山背斜西翼(新开店断裂上)的山脚处(见图4),三级和三级以上河流阶地剖面发生了陡降(图8)。笔者推测这可能是河流汇流后形成的,由于此处水量的增大造成三江口下游的原始河道比上游河道的河拔要低,在形成阶地后会造下游阶地与上游阶地之间形成拐点;另一个原因是北东向河流阶地接近新开店断裂且局部有隆升,造成这里的三级阶地仅在局部发育。

青衣江河三级和三级以上河流阶地在大川-双石断裂附近有翘起现象,疑似为大川-双石断裂逆冲推覆过程中由拖曳而形成,其进入了阶地不发育的深切峡谷地段(图4、图8)。这里的地层为坚硬的白垩纪-古近纪砾岩层。

在芦山盆地西缘近峡谷地区只存在高级阶地,而低级阶地不发育。当河流达到铜头村一带(图7B)时,才会出现低级阶地,芦山盆地西部阶地疑似有拱曲的现象(图8)。拱曲量从低级阶地到高级阶地依次增加,分别为 T3-15m、T4-22m、T5-30m、T6-36m。根据该地区的峡谷和阶地变形特征,推测双石-大川主断裂下盘、芦山盆地西缘存在一逆冲断裂,该断裂和双石-大川断裂之间的夹块快速抬升,导致了深切峡谷的形成和阶地的变形。根据唐熊等(2009)对洪雅阳坪的阶地测年结果以及戴宗明(2012)对青藏高原东部四姑娘山周边阶地的总结,笔者粗略地估计 T3 阶地的年龄范围在 50—97ka 左右;由于 DEM 分辨率和误差的原因以及 T1 和 T2 阶地的变形未知,所以笔者推测该地区至少在晚更新世以来有过活动;而利用唐熊等(2009)的阶地测年结果,反映出的变形速率为 0.135—0.30mm/a,这与李勇等(2006)推测的大邑断裂的逆冲速率为 0.13—0.24mm/a 接近。芦山地震震中的投影位于芦山盆地内部,这里是断层的延伸与地表的交界处,同时也位于新开店断裂和大邑断裂之间(房立华等,2013;徐锡伟等,2013),而本文给出的阶地变形在芦山地震震中西南一点,尽管还不能很好地验证阶地变形由芦山发震构造引起,但是却表明在该地区确实发生了一些构造变形,时间至少在晚更新世。

5 结语

综上所述,笔者通过 DEM 技术自动提取了河流阶地地面的信息,得到了以下几点认识:

(1) 形成河流阶地的原因复杂,河流阶地的形态特征随着时间的流逝而被修改,尤其是后期的人工改造导致了对河流阶地的准确量化提取十分困难,这也是地貌学研究中的综合性方法与 GIS 定量方法互不兼容的一个表现。

(2) 在提取河流阶地时,对于坡度、曲率等参数的设定还是比较主观的,需要人为对研究地区进行一定的综合研判,而全自动化的河流阶地提取还需要进一步的研究。

(3) 根据阶地分布图、阶地拔河纵剖面以及野外结果验证,说明采用 DEM 提取阶地的方法是可行的。虽然其提取的阶地有一定的误差,但是该方法能大大降低野外工作量,提前预知研究区域的各级别阶地分布,使野外工作更具针对性。

致谢:感谢中科院地理所秦承志研究员在阶地提取方法研究中给予的宝贵建议,感谢审稿专家提供的宝贵修改意见。

参考文献

- 陈桂华,徐锡伟,闻学泽,王亚丽,郑荣章,2006.数字航空摄影测量学方法在活动构造中的应用.地球科学(中国地质大学学报),31(3):405—410.
- 陈立春,冉勇康,王虎,李彦宝,马兴全,2013.芦山地震与龙门山断裂带南段活动性.科学通报,58(20):

1925—1932.

- 陈涛, 张培震, 刘静, 李传友, 任治坤, 2014. 机载激光雷达技术与海原断裂带的精细地貌定量研究. 科学通报, (14): 1293—1304.
- 崔之久, 潘保田, 1996. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升. 中国科学 (D 辑), **26** (4): 378—384.
- 戴宗明, 2012. 青藏高原东部四姑娘山地区新生代隆升 [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学.
- 董绍鹏, 韩竹军, 尹金辉, 李峰, 安艳芬, 2008. 龙门山山前大邑断裂活动时代与最新构造变形样式初步研究. 地震地质, **30** (4): 996—1003.
- 房立华, 吴建平, 王未来, 吕作勇, 王长在, 杨婷, 蔡妍, 2013. 四川芦山 $M_S7.0$ 级地震及其余震序列重定位. 科学通报, (20): 004.
- 宫会玲, 冉勇康, 陈立春, 2008. 基于 DEM 的阶地分析方法. 地震地质, **31**: 339—348.
- 黄映聪, 2006. 西藏门巴地区层状地貌特征及其形成机制. 世界地质, **25** (2): 154—159.
- 贾营营, 付碧宏, 王岩, 时丕龙, 刘锋, 2010. 青藏高原东缘龙门山断裂带晚新生代构造地貌生长及水系响应. 第四纪研究, **30** (4): 825—836.
- 李传友, 徐锡伟, 甘卫军, 闻学泽, 郑文俊, 魏占玉, 许冲, 谭锡斌, 陈桂华, 梁明剑, 2013. 四川省芦山 $M_S7.0$ 地震发震构造分析. 地震地质, **35** (3): 671—683.
- 李康, 徐锡伟, 谭锡斌, 2013. 龙泉山背斜的地壳缩短与隆升——来自河流阶地变形的证据. 地震地质, **35** (1): 22—36.
- 李涛, 陈杰, 肖伟鹏, 黄明达, 2011. 利用变形河流阶地限定帕米尔北缘木什背斜的缩短、隆升和侧向扩展. 地震地质, **33** (2) 308—322.
- 李勇, 曹叔尤, 周荣军, 2005. 晚新生代岷江下蚀速率及其对青藏高原东缘山脉隆升机制和形成时限的定量约束. 地质学报, **79** (1): 28—37.
- 李勇, 周荣军, Densmore A.L. 等, 2006. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应. 北京: 地质出版社.
- 刘静, 陈涛, 张培震, 张会平, 郑文俊, 任治坤, 梁诗明, 盛传贞, 甘卫军, 2013. 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, **58** (1): 41—45.
- 潘保田, 李吉均, 2000. 青藏高原地面抬升证据讨论. 兰州大学学报: 自然科学版, **36** (4): 100—111.
- 唐熊, 陶晓风, 2009. 雅安地区青衣江流域第四纪阶地特征分析. 沉积学报, **27** (1): 137—141.
- 田勤俭, 郝凯, 王林, 马保起, 张世民, 2009. 汶川 8.0 级地震发震断层逆冲活动的地震地貌与古地震初步研究. 第四纪研究, **29** (3): 464—471.
- 徐锡伟, 韩竹军, 李传友, 2013. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震. 科学通报, **58** (15): 1887—1893.
- 杨景春, 谭利华, 李有利, 段烽军, 1998. 祁连山北麓河流阶地与新构造演化. 第四纪研究, **3**: 229—237.
- 杨晓平, 蒋溥, 宋方敏, 梁小华, 陈献程, 邓忠文, 1999. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据. 地震地质, **21** (4): 341—345.
- 张军龙, 任金卫, 徐岳仁, 陈长云, 2013. 网格 DEM 剖面方法获取岷江上游层状地貌参数. 武汉大学学报: 信息科学版, **38** (11): 1378—1382.
- 张世民, 丁锐, 毛昌伟, 吕志强, 2010. 青藏高原东缘龙门山山系构造隆起的地貌表现. 第四纪研究, **30** (4): 791—802.
- 张岳桥, 李海龙, 2010. 龙门山断裂带西南段晚第四纪活动性调查与分析. 第四纪研究, **30** (4): 699—710.
- Burchfiel B., Zhiliang C., Yupinc L., Royden L., 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China. *International Geology Review*, **37**(8): 661—735.
- Chen Lichun, Ran Yongkang, Wang Hu et al., 2013. The Lushan $M_S7.0$ earthquake and activity of the southern segment of the Longmenshan fault zone. *Chinese Science Bulletin*, **58** (28-29): 3475—3482.
- Chen Lichun, Wngng Hu, Ran Yongkang et al., 2014. The 2013 Lushan $M_S7.0$ earthquake varied seismogenic

- structure from the 2008 Wenchuan Earthquake. *Seismological Research Letters*, **85**: 34—39.
- Demoulin A., Bovy B., Rixhon G., Cornet Y., 2007. An automated method to extract fluvial terraces from digital elevation models: The Vesdre valley, a case study in eastern Belgium. *Geomorphology*, **91**(1): 51—64.
- Drăguț L., Blaschke T., 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, **81**(3-4): 330—344.
- Hubert F.A., Suppe J., Gonzalez M.R., Wang X., 2007. Mechanisms of active folding of the landscape(southern Tian Shan, China). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*(1978–2012), **112**(B3): 1—29.
- Mulder V., De Bruin S., Schaeppman M., Mayr T., 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping—a review. *Geoderma*, **162**(1): 1—19.
- Qin C.Z., Zhu A.X., Shi X., Li B.L., Pei T., Zhou C.H., 2009. Quantification of spatial gradation of slope positions. *Geomorphology*, **110**(3-4): 152—161.
- Schäuble, H. Erosionsmodellierungen mit GIS, 2000. Probleme und Lösungen zur exakten Prognose von Erosion und Akkumulation. *Ergebnisse der Jahrestagung des Arbeitskreises GIS*, **25**(26): 51—62.
- Scharer K., Burbank D., Chen J., Weldon R., 2006. Kinematic models of fluvial terraces over active detachment folds: Constraints on the growth mechanism of the Kashi-Atushi fold system, Chinese Tian Shan. *Geological Society of America Bulletin*, **118**(7-8): 1006—1021.

An Automated Method to Extract Fluvial Terraces of Qingyi River on the Southern Longmenshan

Liang Peng, Tian Qinjian, Su Peng, Wang Lin, Li Wenqiao and Hu Chaozhong

(Institute of earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract River terrace is a kind of timeliness and continuous landforms and when crossing a fault they can be used effectively to identify the regional tectonic activity. Qingyi river is a regional river across the southern Longmenshan, because of the influence of fault activity and erosion, there retain a few of terraces. In order to identify fluvial terrace quickly and reduce the workload in the field, we utilized ArcGIS and MATLAB platform to extract terrace based on 2m DEM derived from aerial remote sensing technology and 1:50,000 digital elevation model, and then we carried out clustering analysis, field measuring simulation, Finally we obtained more local residual terraces through the computer quickly, and generated a more complete longitudinal profile of river terraces. Our field measurements confirmed high similarity and consistency with computer automatic extraction. In the complete terrace profile, we found a suspected arch phenomenon in Lushan basin and tilt of terrace around Dachuan-Shuangshi fault. We speculate thrust-nappe generate the tilt around Dachuan-shuangshi fault and an undiscovered fault on the east of Dachuan-shuangshi fault lead to the arch phenomenon in Lushan basin. Combining ages of terraces near this region, we infer this region has experienced tectonic activity since late Pleistocene.

Key words: Fluvial terraces; Computer extraction; Qingyi river; GIS; DEM