

doi:10.3799/dqkx.2017.061

基于无人机遥感的河流阶地提取

李 辉¹, 余忠迪¹, 蔡晓斌², 胡尊语¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国科学院测量与地球物理研究所, 湖北武汉 430077

摘要: 河流阶地记录了河流演变过程中因构造抬升或气候变化引起的侵蚀基准面变化的信息, 阶地的提取与划分对于新构造研究与古气候重建有着重要的意义。在分析传统阶地提取方法不足的基础上, 提出了一种利用无人机遥感进行阶地提取的新方法。该方法利用无人机航拍影像和高精度地面控制点, 通过基于计算机视觉的多视立体运动恢复结构(structure from motion with multi-view stereo, SfM-MVS)技术自动生成研究区高分辨率的正射影像和数字表面模型(digital surface model, DSM), 在此基础上根据河流阶地的几何特征, 利用高程、坡度及影像灰度等统计量实现阶地信息的提取。利用这一方法对汉江支流蛮河下游河段的阶地进行了提取试验。结果表明, 该方法能够提取到两级河流阶地和一级河漫滩信息, 提取结果与野外实测结果有较好的一致性。与传统阶地提取方法相比, 该方法具有精度好、效率高、可视化效果全面直观等优势, 显示出无人机遥感在河流地貌学研究中的巨大优势和广阔应用前景。

关键词: 河流阶地; 无人机; 遥感; 数字表面模型; 汉江; 水文地质。

中图分类号: P904

文章编号: 1000-2383(2017)05-0734-09

收稿日期: 2016-12-16

River Terrace Extraction Based on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing

Li Hui¹, Yu Zhongdi¹, Cai Xiaobin², Hu Zunyu¹

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: River terraces record the information of environmental changes in the process of river evolution. Proper identification and classification of terraces are of great importance to the paleo-environmental reconstruction and local tectonic evolution. Based on the analysis of drawbacks of the traditional approaches, a terrace extraction method using the unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing is proposed. In this paper, the UAV images and high precision ground control points are used to automatically generate the high resolution DSM (digital surface model) and orthophoto using computer vision-based structure from motion with multi-view stereo photogrammetry (SfM-MVS) techniques. On this basis, the geometric characteristics of river terraces, including the elevation, slope, and image textures are employed to delineate terraces. The proposed method is used to extract the river terraces in the lower reaches of Manhe River, a branch of Hanjiang River. The results show that the terraces extracted with the proposed method have a good agreement with those measured in the field. The proposed method has advantages of high precision and efficiency, and effective visualization for terrace representation. This method provides the technical support for the recognition of terraces, and reveals the potential of UAV remote sensing in geomorphology studies.

Key words: river terrace; unmanned aerial vehicle; remote sensing; digital surface model; Hanjiang River; hydrogeology.

0 引言

河流阶地是在地壳垂直升降运动的作用下由河

流侵蚀下切而形成的阶梯状地貌, 是地球内外动力共同作用的结果。河流阶地及其相关的沉积地层包含着丰富的地质信息, 记录着区域构造活动、气候变

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41201429, 41391240191); 中国地质调查局项目(No.DD20160255)。

作者简介: 李辉(1979—), 男, 副教授, 主要从事遥感地质应用等研究。ORCID: 0000-0001-9275-5408. E-mail: leelmars@gmail.com

引用格式: 李辉, 余忠迪, 蔡晓斌, 等, 2017. 基于无人机遥感的河流阶地提取. 地球科学, 42(5): 734-742.

迁、侵蚀基准面变化和区域水系演化等.因此,长期以来河流阶地一直是地球科学的重要研究内容(韩芳等, 2010; Lewin and Gibbard, 2010; Erlanger *et al.*, 2012; Schildgen *et al.*, 2012; 胡小飞等, 2013; 庞奖励等, 2014; 张泽林等, 2015).

河流阶地的正确识别与划分是进行河流阶地研究的基础.传统的方法利用阶地的几何特征,通过垂直于河床的一系列剖面或者高程相位点来识别阶地.该方法提取阶地效率较低,可能丢失部分有效信息,常导致河流阶地的级数划分和高程测量存在较多分歧(向芳等, 2005).随着遥感技术的迅速发展特别是数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据的日益普及,为阶地提取提供了新的思路. Demoulin *et al.* (2007) 利用 DEM 将河拔高度重新投影到高程—坡度图上,得到高度集中的平坦阶地的高程值,重建了连续阶地纵剖面,该方法将阶地的形态特征抽象成高程和坡度这两个可以量化的值,并将聚类分析的数学思想引入到阶地划分中.该方法奠定了利用 DEM 提取阶地的方法基础,在国内外得到了广泛应用(Passaro *et al.*, 2011; 宋卓沁等, 2014; 宫会玲和冉永康, 2015; Del Val *et al.*, 2015). 利用 DEM 进行河流阶地提取时,其分辨率对结果的准确性非常重要.对于阶地发育较差或阶地面积较小的河段,对 DEM 分辨率要求较高.目前可以方便获取的 DEM 数据分辨率不高(约为 30 m),难以满足大多数河流阶地提取所需的精度要求.传统的全站仪和差分 GPS 虽然可以获取高精度的数据,但获取数据耗时较长、效率较低.最新的 LiDAR 技术可以高效获取厘米级分辨率的高精度 DEM,但 LiDAR 设备昂贵,且野外复杂的地形条件也限制了其广泛应用.

近年来,无人机成本和可操作性有了革命性的突破,使其从传统的军事、航测等专业领域进入到大众消费市场.无人机获取影像具有成本低、速度快和分辨率高等优点,是传统卫星遥感无法比拟的(李冰等, 2012).同时,基于计算机视觉及 SfM(structure from motion)的图像处理技术解决了利用无人机影像生产 DSM(digital surface model)和正射产品过程中,因飞行姿态不稳产生的旋片角过大及消费者级相机成像存在畸变等造成的一系列问题(Turner *et al.*, 2012).无人机软硬件技术的发展大大拓宽了其应用领域,受到了地学界的广泛关注. D'Oleireoltmanns(2012)利用固定翼无人机和高精度地面控制点,研究了土壤侵蚀过程. Diaz-Varela

et al. (2014)利用无人机遥感成功地实现了农业梯田的自动提取,其中生成的 DSM 的精度足以和昂贵的 LIDAR 相媲美. Tonkin *et al.* (2014)利用无人机结合 SfM 技术在北威尔士进行地貌调查,获得了研究区约 9 cm 分辨率的影像,垂直均方根误差(RMSE)精度为 0.2 m,表明无人机在数据分辨率和获取效率上比传统的全站仪更有优势. Gonçalves and Henriques(2015)利用轻型无人机和廉价相机进行了海岸退化研究,获得了海岸带 10 cm 分辨率的 DSM, RMSE 误差为 3.5~5.0 cm,表明无人机可以替代传统的方法,对海岸地貌进行业务化监测.

以上研究表明无人机遥感可以方便、快捷地获取研究区的高分辨率正射影像和 DSM,显示出其应用于河流阶地研究的巨大潜力,然而,目前仍缺乏利用无人机遥感进行河流阶地提取的相关研究.因此,本文拟探讨利用消费者级无人机进行河流阶地提取的步骤与方法,为阶地的识别与划分提供新的技术支撑.

1 材料与方法

1.1 无人机系统

目前无人机种类繁多,有无人直升机、固定翼无人机和多旋翼无人机等多种机型.不同无人机具有不同的特点和适用领域.多旋翼无人机飞行速度可控,飞行高度可调且可以低空飞行,同时该种类型无人机不受起降场地限制,因而更适合用于复杂飞行环境条件下小区域(一般<1 km²)影像的获取(金伟等, 2009).

本研究选用深圳大疆科技(DJI)2016 年 3 月发布的消费者级四旋翼无人机 Phantom 4(图 1).该无人机由飞行器、遥控器、云台相机以及配套使用的移动设备(例如 iPad)组成.飞行器重 1 380 g,配备全新的影像稳定系统,能补偿飞行器的激烈运动,控制精度高达±0.03°.飞控系统集成于飞行器机身内,具备双冗余 IMU(inertial measurement units)和指南针系统.一体式云台位于机身下部,其上搭载嵌入式相机.遥控器配备灵敏的控制杆、专用按钮,工作频率 2.400~2.483 GHz,可与移动设备互联并通过 app 控制云台及相机、制定飞行方案.内置 DJI Light-bridge 高清图传系统,图像传输和可遥控距离长达 5 km.该无人机集成了先进的前视障碍物感知系统,能主动避开飞行过程中的障碍物. Phantom 4 能同时接受 GPS 及 GLONASS 定位卫星信号,可获取



图 1 Phantom 4 无人机及地面控制系统
Fig.1 Phantom 4 UAV and ground control system

5 m精度的影像位置信息. Phantom 4 搭载的嵌入式相机为价格低廉的消费者级相机, 焦距为 20 mm (35 mm 格式等效), 内置 1 200 万像素 1/2.3 in (1 in=2.54 cm) CMOS 图像传感器. 为更好地适应航拍, 厂家对相机镜头进行了专门优化, 94°视角、f/2.8光圈的超低畸变镜头, 成像清晰锐利. Phantom 4 携带了高能量密度智能飞行电池和高效率的动力系统, 最大平飞速度 20 m/s, 单个电池最大续航时间约为 28 min.

由于 Phantom 4 搭载相机并非专业量测相机, 相机存在一定的镜头畸变、像主点偏移等误差, 需要对相机参数进行检校. 本文在图像处理部分利用精确的地面控制点结合多视图标定技术对相机的参数进行估算和优化.

1.2 数据获取

(1)研究区概况. 本文选择湖北省南漳县境内蛮河下游河段进行无人机遥感阶地提取试验(图 2). 研究区地处江汉平原北缘, 为丘陵山区与平原过渡地

带, 其下游为大型水库三道河水库. 蛮河为汉江一级支流, 发源于保康县布峪, 与北支王河在南漳县武安堰西汇合, 在钟祥市关家山汇入汉江, 全长 155 km, 流域面积 3 086 km². 蛮河流域的地形以峡谷和盆地为主, 峡谷地段漫滩较少, 阶地狭窄或缺失; 盆地地段的河流阶地较发育, 其中 I-II 级阶地分布较广泛、阶地面较平坦, 高级阶地的阶地面多遭受冲沟强烈切割, 破坏严重, 因此采用传统方法难以有效提取区域的阶地信息.

(2)无人机影像获取. 在影像获取之前需要在研究区选择控制点, 用于影像校正和精度验证. 控制点要求分布均匀、标志易于识别且固定不动. 由于野外很难找到满足条件的控制点, 本次试验定制了 19 块 40 cm×40 cm 喷有红白色块的塑料板作为控制点, 在研究区内均匀布设, 并利用钉子固定, 然后使用测量级 RTK GPS 测量控制点中心坐标(图 3). 仪器标称的水平定位精度小于 0.8 cm, 垂直精度小于 1.5 cm.

本文利用 Map Pilot 软件来制定飞行计划. Map Pilot 是一款优秀的无人机航线规划软件, 支持包括 DJI 系列在内的多种型号无人机. 飞行前只需在软件提供的底图上确定航拍范围、设置飞行高度、最大飞行速度及影像重叠度等参数, 软件便会自动生成航线、预估飞行时长及航拍影像数量. 飞行过程中, 该软件可以实时显示飞机位置、高度、速度、相机参数及无线信号强度等信息, 方便用户监控航拍过程. 本次试验设计航高 60 m, 影像重叠度为 80%, 最大飞行速度为 6 m/s(图 4). 无人机航拍在 2016 年 6 月 11 日进行, 当日天气多云转晴, 能见度高, 风力小于 3 级, 比较适合航拍. 无人机航拍过程包括手动起

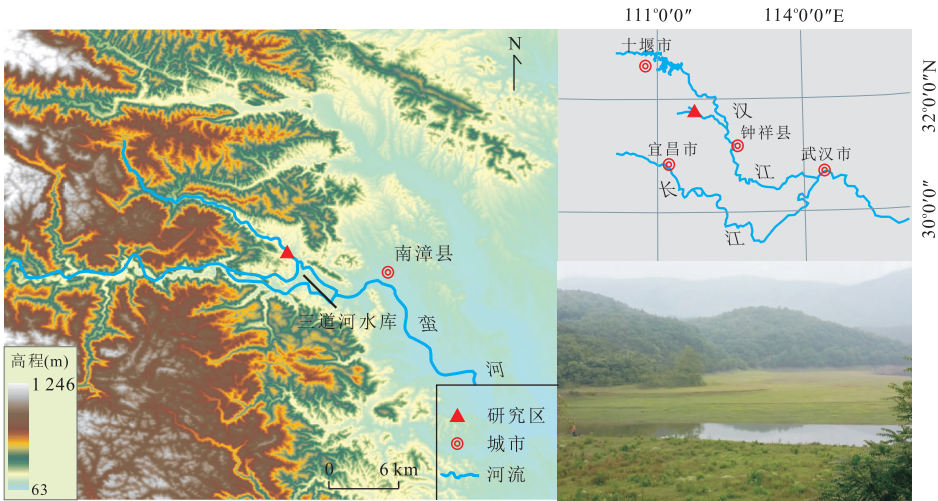


图 2 研究区位置
Fig.2 Location of the study area



图 3 地面控制点测量

Fig.3 Ground control points measurement



图 4 研究河段无人机航线规划

Fig.4 UAV flight planning for the study reach

飞、上传飞行任务、按规划航线拍摄、任务结束自动返航等步骤,全程耗时约 18 min,共获得研究区 347 张影像,分辨率约为 2.6 cm/pixel.影像成像质量较好,没有明显的模糊失真,其中的控制点清晰可见。

(3)图像处理.无人机影像不同于航空影像,其重叠度较高、像幅小、基线短、旋偏角大且畸变严重、缺乏高精度的 GPS 和 IMU 数据,因此传统的航空摄影测量流程无法用于无人机影像处理.近年出现的基于多视立体摄影测量的 SfM 技术可以从多视角重复观测的影像中高效重建三维地形,并同时计算成像相机参数 (Smith *et al.*, 2015),为无人机影像处理提供了新思路.SfM 与传统摄影测量存在本质的区别,其对相机拍摄位置、图像尺度及拍摄焦距没有要求,因而成为无人机影像处理的主流方法.本文选择基于计算机视觉和 SfM 技术的 Pix4D Mapper 软件进行无人机图像处理.该软件由瑞士 Pix4D 公司研发 Pix4D Mapper 完全基于影像内容、利用独特优化技术和区域网平差技术来校准影像,可以

全自动、快速地生成 DSM 和正射影像.

Pix4D Mapper 首先通过 SIFT 算法 (Lowe, 2004) 结合影像 GPS 位置信息从输入的影像中快速提取大量特征点,然后采用高效匹配算法进行特征点匹配. SfM 利用成功匹配的特征点自动求解相机参数和场景的几何形态等信息.这些特征点可以从一幅图像跟踪到另一幅图像,进而估计相机位置和特征点的三维坐标,然后采用非线性最小二乘算法进行迭代优化.因此, Pix4D Mapper 不需要提前对相机进行校准,相机镜头畸变参数可以通过计算获得.由于 SfM 生成的点云比较稀疏,难以插值生成连续的地形信息,因此需要进行加密处理.点云加密通过 MVS 算法实现,该算法基于优化后的相机参数逐像素对图像进行搜索,来获取图像间最佳匹配点,从而生成加密点云.在此基础上,通过局部内插法生成 DSM.利用生成的 DSM 分别对影像进行逐像素数字微分纠正,将原始影像拼接、校正生成正射影像.由于机载 GPS 定位精度有限,通常需要通过加入地面控制点参与 SfM 计算,来优化估计的相机参数,并生成高精度的正射影像和 DSM 产品.本文利用采集的 12 个控制点进行几何校正,剩下的 7 个作为检查点用于精度检验.选择椭球模型为 WGS84,投影方式为 UTM N49.

1.3 阶地提取

河流阶地由阶地面和阶地坎组成.阶地面比较平坦,微向河床倾斜,在河谷两侧谷坡连续分布,在影像上表现出较为均一的纹理;两级阶地面之间为阶地陡坎,坡度较大,在图像上呈较浅色调.阶地的级数是由下而上顺序排列,高于河漫滩的最低一级阶地,称为一级阶地,向上依次为二级、三级等.本文根据阶地面的地形特征及对应影像的纹理特征,综合利用坡度、地表曲率与影像色调纹理特征来提取阶地.首先在 ArcGIS 软件中利用 DSM 分别计算研究河段的坡度和曲率,结合正射影像及野外考察结果确定阶地坡度及曲率等参数的阈值,并进行二值化,接着进行栅格叠加运算,得到符合上述条件的栅格范围,然后转换为矢量多边形即获取阶地面的范围.由于在栅格叠加过程中会产生一些细碎小图斑,笔者根据野外调查结果对提取结果进行了必要的修改与编辑。

2 结果与分析

2.1 正射影像与 DSM

利用 Pix4D Mapper 软件对无人机获取影像进

表 1 相机参数
Table 1 Camera parameters

	焦距(mm)	主像点 x (mm ⁻¹)	主像点 y (mm ⁻¹)	R_1	R_2	R_3	T_1	T_2
初始值	3.722	3.159	2.369	-0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.001
校正值	3.417	3.180	2.296	-0.007	0.005	0.005	-0.001	0.000

注: R_1, R_2, R_3 .相机镜头径向畸变参数; T_1, T_2 .相机镜头切向畸变参数.

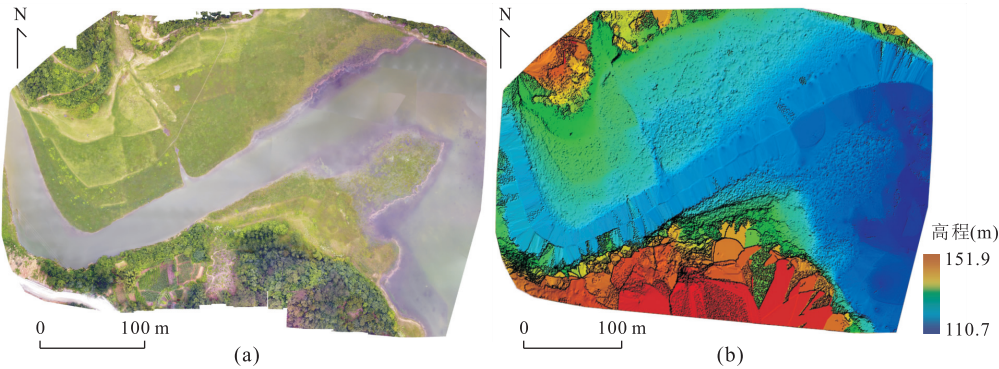


图 5 研究河段正射影像(a)和 DSM(b)
Fig.5 Orthomosaic (a) and DSM (b) of the study reach

行处理,计算得到校正后的相机参数(表 1).从表 1 中可以看出初始参数与校正后的相机参数存在较小的偏差,该偏差主要由非测量相机镜头畸变所导致的.利用 SIFT 算法平均从每景影像中提取到 24 822 个二维特征点,其中成功匹配 4 374 个.研究区共生成 1 316 648 个二维特征点,其中的 488 522 个三维特征点用于区域网平差,平均投影误差为 0.18 pixel.点云加密过程共生成 19 335 216 个加密点,平均点云密度为 29.7 个/m³.最终生成的研究区正射影像(图 5a)和 DSM(图 5b).从图 5 中可以看出,正射影像图像清晰、色彩逼真、色调均匀、反差适中、分辨率高,地物类型清晰可辨;生成的 DSM 精度高,高程范围为 111~152 m,地形高差层次分明,地貌细节清晰可见,河流阶地特征明显.需要指出的是,由于水体表面比较均一,SIFT 算法很难提取到大量特征点,因此河道内点云密度较小,插值生成的 DSM 略有异常,但不影响阶地的识别.

利用 7 个检查点对产品精度进行评价,结果如表 2 所示,以 RMSE 表示的平面定位精度 X 轴方向(东西方向)误差为 0.053 7 m,Y 轴方向(南北方向)误差为 0.047 6 m,Z 轴方向(垂直方向)误差为 0.116 7 m,可以看出生成的产品精度较高,基本能够满足 1:250 平面制图要求,适合小型地貌研究.

2.2 阶地

利用高精度的 DSM 结合阶地几何特征提取的河流阶地如图 6 所示,图中的标示的剖面线和照片

表 2 检查点误差
Table 2 Errors of check points

编号	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	0.086 9	-0.006 1	-0.198 7
2	0.065 7	-0.022 1	-0.093 8
3	0.004 3	-0.044 2	0.063 5
4	0.005 2	-0.021 7	0.096 8
5	-0.059 0	0.056 9	-0.055 6
6	-0.064 1	-0.010 0	0.146 8
7	-0.025 9	0.097 7	-0.095 5
RMSE(m)	0.053 7	0.047 6	0.116 7

位置用于后面阶地验证.从图中看出,研究河段共识别出 2 级河流阶地(T2,T1)和一级现代漫滩(T0).由于研究区“Z”字形河道有两次拐弯,因此,两岸阶地呈不对称分布,阶地主要分布在河流凸岸,其中左岸阶地的规模要大于右岸.从图 6 可以明显地看出,T0 面积最大,其次为 T1,T2 面积最小.阶地受到人为干扰少,阶地保留较为完整,其上为自然生长的草地.不同阶地表面上生长的草的密度和高度也不一,因此,很容易通过色调从正射影像中识别,这也佐证了本文方法提取阶地的正确性.

结合 DSM 统计了提取阶地的高度及面积信息(表 3).由于研究区为河流的下游河段,不同级别的阶地高差不大.从表中可以看出,左岸的 T2、T1 和 T0 前缘高度分别为 126.1 m、124.5 m 和 122.8 m,高差分别为 1.6 m 和 1.7 m.右岸的 T2、T1 和 T0 前缘高度分别为 125.9 m、123.8 m 和 122.6 m,高差分

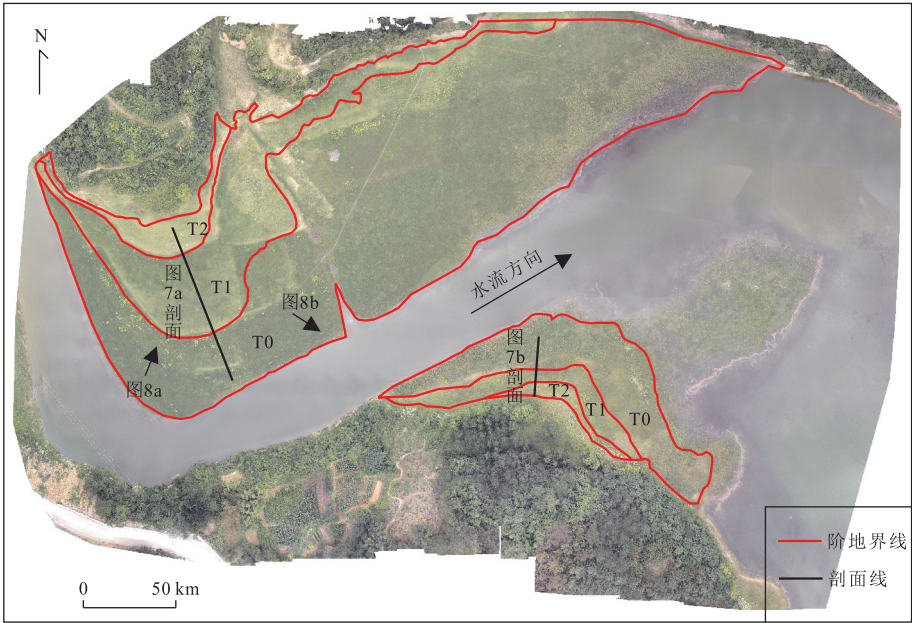


图 6 研究河段阶地提取结果

Fig.6 Extracted terraces in the study reach

表 3 阶地高度信息

阶地	前缘高度(m)		后缘高度(m)		面积(m ²)	
	左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸
T0	122.8	122.6	123.9	123.1	27 721.2	4 767.8
T1	124.5	123.8	125.3	124.6	7 373.2	1 422.0
T2	126.1	125.9	126.3	126.2	1 357.5	488.5

别为 2.1 m 和 1.2 m.由于右岸阶地在左岸阶地下游,因此,对应的阶地高度也略有降低.

为了证明方法的可行性,笔者对提取的阶地进行了地形剖面分析.两个剖面的位置如图 6 所示,利用 DSM 插值得到的对应剖面如图 7 所示.由于研究河段阶地未受到人为扰动,笔者从图 7 中也可以清

楚地识别出阶地面和阶地陡坎.阶地面坡度平缓向河流方向略微倾斜,其上生长不同高度的杂草和灌木,故杂草和灌木在图 7 呈现锯齿状起伏;阶地陡坎坡度较大,植被低矮生长稀疏,故植被在图 7 中比较光滑.由此可见,利用无人机遥感生成的 DSM 分辨率及精度均很高,可以识别细微的地表高程起伏,适用于微型及小型地貌研究.此外,从图 7 中也可以看出上游阶地的高度要略高于对应的下游阶地.

笔者对阶地提取结果进行野外验证.图 8 为野外拍摄的阶地照片,照片的位置和拍摄方向在图 6 中标明.从图 8 中可以看出,河流两岸的阶地未受后期破坏和人为干扰,各级阶地面及阶地陡坎清晰可见,与本文提取的结果一致,证实了利用无人机遥感

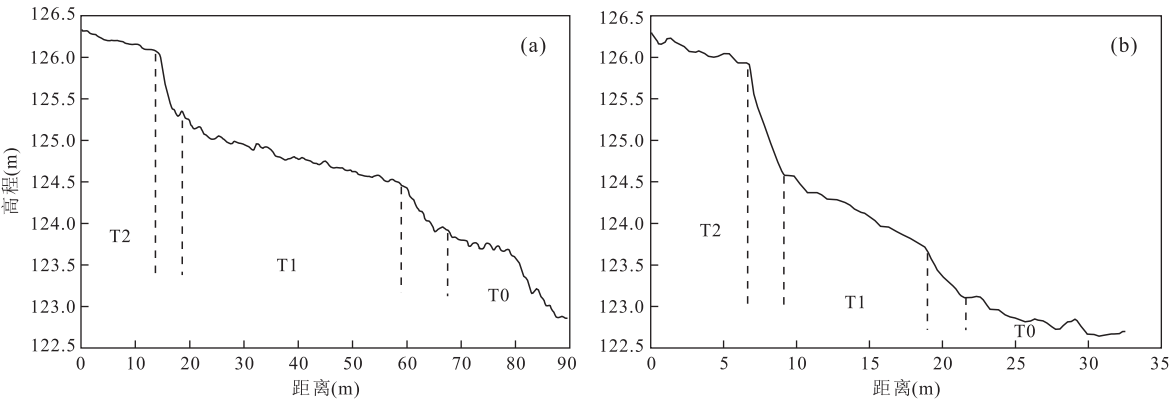


图 7 研究河道左岸(a)和右岸(b)阶地剖面

Fig.7 Elevation profiles of terraces in the left (a) and right (b) bank of the study reach

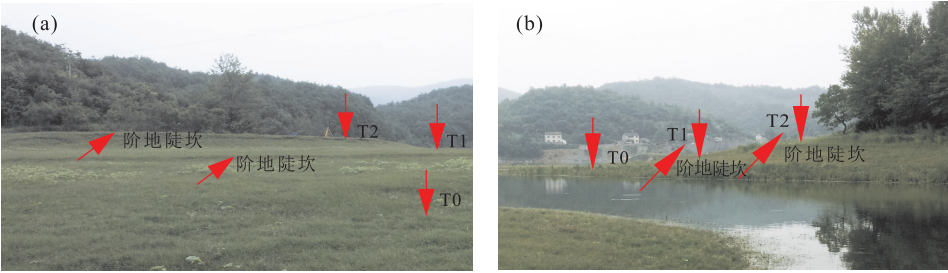


图 8 研究区左岸(a)右岸(b)阶地野外验证

Fig.8 Field validation of extracted terraces in the left (a) and right (b) bank of the study reach

进行阶地提取的可靠性.

3 讨论

高精度的地形数据是地貌研究的关键.传统的地形数据采集方法多采用野外实地测量、高分辨率航片和卫片的解译等,这些方法受自然条件限制,具有人工消耗大、效率低、分辨率差、费用高等特点,限制了对研究区精确测量和深入研究.尽管目前 LiDAR 测量技术可以获取高分辨率的地形数据,但是其高昂的测量成本和相对复杂的后期数据处理限制了其大众化应用.无人机遥感成本低廉,可在不同高度对地面数据进行采集,影像具有高清晰度、大比例尺、高现势性等优点.此外,无人机起降受场地限制较小,其稳定性、安全性好,成像质量、精度都远远高于大飞机航拍,特别适合地形和气候条件复杂区域的影像获取.利用 SfM-MVS 技术结合高精度的地面控制点,可以从无人机影像中自动生成研究区的三维地形数据.目前国内利用无人机结合 SfM-MVS 图像技术进行地貌研究的工作还较少,魏占玉等(2015)研究了 SfM-MVS 方法生成的高密度点云精度,并将其与 LiDAR 方法进行对比.结果表明,SfM-MVS 平均点云密度远高于 LiDAR 点云密度,且数据精度与 LiDAR 相当,但其数据获取成本和效率较 LiDAR 方法优越.王朋涛等(2016)将小型无人机遥感生成的 DSM 与 LiDAR 数据进行对比分析,发现无人机生成的地形数据比后者具有更高的分辨率,具备重建高精度微细地貌结构的能力,并且可以用于微地貌分析及进一步的数据挖掘.随着无人机技术研究的不断深入和创新,无人机遥感作为高精度地形数据获取的有效途径,将在地貌、构造及自然灾害研究中发挥不可替代的作用.

高精度的地形数据为阶地的识别与划分提供了基础.传统的阶地识别方法主要依据剖面线.河流阶

地的形态特征随着时间的流逝而被修改,特别在构造活动强烈而且地貌面被严重侵蚀的地区,阶地发育较差,阶地面较小,剖面线方法不能完全地分辨出各级阶地,导致了河流阶地的准确量化提取十分困难(宫会玲等,2008).本文方法能够充分利用无人机遥感生成 DSM 的高程信息及正射影像的灰度信息,来解译阶地的平面分布、高程分布等信息,具有较高的准确性,可以减少野外阶地调查测绘的工作量,从而克服传统地貌制图调查效率低、范围小及误差大的缺点,弥补了利用卫星遥感地貌解译的某些局限性.在构造活跃区还可以利用高精度的 DSM 计算出阶地变形量,为活动构造的定量研究提供支持(王朋涛等,2016).此外,多视角无人机影像还可以重建三维景观,具有很强的真实感,使地形信息更加丰富,可以很好地应用于阶地研究.

4 结论

(1)利用无人机遥感和高精度野外控制点,得到研究区 2.6 cm 分辨率的正射影像和 DSM 产品,经过检查点检验,产品的平面精度约为 5 cm,垂直精度约为 12 cm,可满足小型地貌研究的需要.

(2)根据生成的 DSM 和正射影像提取出研究区两级河流阶地和一级高河漫滩.河流左岸各级阶地略高于右岸、阶地面积也大于右岸,两岸阶地呈不对称发育.室内剖面分析和野外验证表明,提取的阶地划分结果与实际考察结果一致,表明利用无人机遥感进行阶地提取是可行的.

(3)无人机遥感克服了传统地貌调查方法和遥感地貌解译手段的不足,可生成高精度的数字地形产品,大大提高了阶地识别的准确度和效率,在地貌学领域具有巨大的优势和广阔的应用前景.

致谢:感谢中国地质大学(武汉)地学院肖国桥副教授对初稿提出的宝贵意见;感谢 PIX4D 公司为

实验数据处理提供 PIX4D Mapper 无人机处理软件(非商业版);感谢匿名审稿专家的意见和建议。

References

- Del Val, M., Iriarte, E., Arriolabengoa, M., et al., 2015. An Automated Method to Extract Fluvial Terraces from LIDAR Based High Resolution Digital Elevation Models: The Oiartzun Valley, a Case Study in the Cantabrian Margin. *Quaternary International*, 364: 35—43. doi: 10.1016/j.quaint.2014.10.030
- Demoulin, A., Bovy, B., Rixhon, G., et al., 2007. An Automated Method to Extract Fluvial Terraces from Digital Elevation Models: The Vesdre Valley, a Case Study in Eastern Belgium. *Geomorphology*, 91 (1—2): 51—64. doi: 10.1016/j.geomorph.2007.01.020
- Diaz-Varela, R. A., Zarco-Tejada, P. J., Angileri, V., et al., 2014. Automatic Identification of Agricultural Terraces through Object-Oriented Analysis of very High Resolution DSMs and Multispectral Imagery Obtained from an Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Environmental Management*, 134 (4): 117—126. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.01.006
- Erlanger, E. D., Granger, D. E., Gibbon, R. J., 2012. Rock Uplift Rates in South Africa from Isochron Burial Dating of Fluvial and Marine Terraces. *Geology*, 40 (11): 1019—1022. doi: 10.1130/g33172.1
- Gonçalves, J. A., Henriques, R., 2015. UAV Photogrammetry for Topographic Monitoring of Coastal Areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104: 101—111. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009
- Gong, H. L., Ran, Y. K., 2015. Digital Terrain Analysis of Anning River Terraces Based on SPOT Image. *North China Earthquake Sciences*, 33(3): 31—36 (in Chinese with English abstract).
- Gong, H. L., Ran, Y. K., Chen, L. C., 2008. The Method of Terrace Analysis Based on DEM—A Case Study in Zimakua of Anninghe Fault. *Seismology and Geology*, 30 (1): 339—348 (in Chinese with English abstract).
- Han, F., Zhang, K. X., Wei, Y., et al., 2010. Sedimentary Sequences and Paleoclimate of Late Pleistocene in Xunhua Basin, Qinghai Province. *Earth Science*, 35 (5): 849—856 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. F., Pan, B. T., Gao, H. S., et al., 2013. Development of Holocene Fluvial Terraces in the Eastern Qilianshan Mountain and Its Relationship with Climatic Changes. *Quaternary Sciences*, 33(4): 723—736 (in Chinese with English abstract).
- Jin, W., Ge, H. L., Du, H. Q., et al., 2009. A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing and Its Application. *Remote Sensing Information*, (1): 88—92 (in Chinese with English abstract).
- Lewin, J., Gibbard, P. L., 2010. Quaternary River Terraces in England: Forms, Sediments and Processes. *Geomorphology*, 120 (3—4): 293—311. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.04.002
- Li, B., Liu, R. Y., Liu, S. H., et al., 2012. Monitoring Vegetation Coverage Variation of Winter Wheat by Low-Altitude UAV Remote Sensing System. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28 (13): 160—165 (in Chinese with English abstract).
- Lowe, D. G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Key Points. *International Journal of Computer Vision*, 60 (2): 91—110. doi: 10.1023/b:visi.0000029664.99615.94
- Pang, J. L., Huang, C. C., Zhou, Y. L., et al., 2014. Formation of the First River Terraces of Hanjiang River and Its Response to the East Asian Monsoon Change. *Geological Review*, 60 (5): 1076—1084 (in Chinese with English abstract).
- Passaro, S., Ferranti, L., de Alteriis, G. D., 2011. The Use of High-Resolution Elevation Histograms for Mapping Submerged Terraces: Tests from the Eastern Tyrrhenian Sea and the Eastern Atlantic Ocean. *Quaternary International*, 232(1—2): 238—249. doi: 10.1016/j.quaint.2010.04.030
- Schildgen, T. F., Cosentino, D., Bookhagen, B., et al., 2012. Multi-Phased Uplift of the Southern Margin of the Central Anatolian Plateau, Turkey: A Record of Tectonic and Upper Mantle Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 317—318: 85—95. doi: 10.1016/j.epsl.2011.12.003
- D'Oleireoltmanns, S., Marzolf, I., Peter, K. D., et al., 2012. Unmanned Aerial Vehicle(UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4(11): 3390—3416.
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., Quincey, D. J., 2015. Structure from Motion Photogrammetry in Physical Geography. *Progress in Physical Geography*, 40(2): 247—275. doi: 10.1177/0309133315615805
- Song, Z. Q., Zhang, J. L., Li, J. J., 2014. A Clustering Approach for Incorporation Spatial Dependence into the Automatic Fluvial Terrace Extraction from Digital Elevation Model: A Case Study from the Zhangla Basin along the Upstream of the Minjiang River. *Seismology and Geology*, 36 (4): 1029—1042 (in Chinese with English abstract).
- Tonkin, T. N., Midgley, N. G., Graham, D. J., et al., 2014. The Potential of Small Unmanned Aircraft Systems and

- Structure-from-Motion for Topographic Surveys: A Test of Emerging Integrated Approaches at Cwm Idwal, North Wales. *Geomorphology*, 226(1–2): 35–43. doi:10.1016/j.geomorph.2014.07.021
- Turner, D., Lucieer, A., Watson, C., 2012. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing*, 4(12): 1392–1410. doi:10.3390/rs4051392
- Wang, P. T., Shao, Y. X., Zhang, H. P., et al., 2016. The Application of sUAV Photogrammetry in Active Tectonics: Shanmagou Site of Haiyuan Fault, for Example. *Quaternary Sciences*, 36(2): 433–442 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Z. Y., Ramon, A., He, H. L., et al., 2015. Accuracy Analysis of Terrain Point Cloud Acquired by “Structure from Motion” Using Aerial Photos. *Seismology and Geology*, 37(2): 636–648 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, F., Zhu, L. D., Wang, C. S., et al., 2005. Terrace Age Correlation and Its Significance in Research of Yangtze Three Gorges, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 32(2): 162–166 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. L., Wu, S. R., Tang, H. M., et al., 2015. Control Effect of Evolution Process of the Yellow River Terrace in Lanzhou on Landslide Activity. *Earth Science*, 40(9): 1585–1597 (in Chinese with English abstract).
- 形分析. 华北地震科学, 33(3): 31–36.
- 宫会玲, 冉勇康, 陈立春, 2008. 基于 DEM 的阶地分析方法——以安宁河断裂紫马跨地区为例. 地震地质, 30(1): 339–348.
- 韩芳, 张克信, 韦一, 等, 2010. 青海循化盆地晚更新世沉积序列与古气候. 地球科学, 35(5): 849–856.
- 胡小飞, 潘保田, 高红山, 等, 2013. 祁连山东段全新世河流阶地发育及其与气候变化的关系研究. 第四纪研究, 33(4): 723–736.
- 金伟, 葛宏立, 杜华强, 等, 2009. 无人机遥感发展与应用概况. 遥感信息, (1): 88–92.
- 李冰, 刘镕源, 刘素红, 等, 2012. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测. 农业工程学报, 28(13): 160–165.
- 庞奖励, 黄春长, 周亚利, 等, 2014. 汉江上游 I 级河流阶地形成及对东亚季风变化的响应. 地质论评, 60(5): 1076–1084.
- 宋卓沁, 张军龙, 李建军, 2014. 基于模糊聚类 and 空间自相关性的河流阶地自动提取方法——以岷江上游漳腊盆地为例. 地震地质, 36(4): 1029–1042.
- 王朋涛, 邵延秀, 张会平, 等, 2016. sUAV 摄影技术在活动构造研究中的应用——以海原断裂骗马沟为例. 第四纪研究, 36(2): 433–442.
- 魏占玉, Ramon, A., 何宏林, 等, 2015. 基于 SfM 方法的高密度点云数据生成及精度分析. 地震地质, 37(2): 636–648.
- 向芳, 朱利东, 王成善, 等, 2005. 长江三峡阶地的年代对比法及其意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 32(2): 162–166.
- 张泽林, 吴树仁, 唐辉明, 等, 2015. 兰州黄河阶地演变过程对滑坡活动的控制效应. 地球科学, 40(9): 1585–1597.

附中文参考文献

宫会玲, 冉勇康, 2015. 基于 SPOT 影像的安宁河阶地数字地