

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.060>



基于边缘提取算法的岩层三角面产状半自动提取

林楠, 徐遥辰, 高博文, 翁旭华, 陈宁华*

浙江大学地球科学学院, 浙江杭州 310027

摘要: 岩层三角面的准确识别和快速检测是利用遥感技术获取地表地层产状信息的有效途径. 提出了利用高分辨率卫星遥感立体像对, 通过自动迭代调整高斯分布模型方差的 Canny 边缘检测算法实现岩层三角面半自动检测和地层产状快速提取方法. 以南天山吐格爾明背斜为实验区, 使用 Worldview-2 立体像对构建数字高程模型和 0.5 m 分辨率的数字正射影像, 利用岩层三角面检测算法提取实验区的岩层三角面和产状. 结果表明, 提出的方法客观高效, 提取准确率达到 90.2%, 能够准确反映构造趋势的变化, 为复杂构造带的地表建模和构造分析提供依据.

关键词: 产状提取; 高分辨率遥感影像; 立体像对; 边缘提取算法; 遥感.

中图分类号: P627

文章编号: 1000-2383(2021)10-3753-11

收稿日期: 2021-03-30

Semi-Automatic Extraction of Triangular Facet Attitude Based on Edge Extraction Algorithm

Lin Nan, Xu Yaochen, Gao Bowen, Weng Xuhua, Chen Ninghua*

School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: Accurate identification and rapid detection of triangular facet is an effective way to use remote sensing technology to obtain stratum attitude information. In this paper, it proposes a method for semi-automatic detection of triangular facet and rapid extraction of bedding attitude. Using high-resolution satellite remote sensing stereo image pairs, the method is based on Canny edge detection algorithm with an automatic iterative adjustment of Gaussian distribution model variance. Taking Tugerming anticline in the South Tianshan Mountains as the experimental area, a digital elevation model and digital orthophoto maps with the resolution of 0.5 m were constructed using Worldview-2 stereo pairs, and 81 triangular facets in the experimental area were extracted. The result shows that the method proposed in this paper is objective and efficient, and the extraction accuracy rate reaches 90.2%. The extracted attitude accurately reflect the changes in structure, providing a basis for surface modeling and structural analysis of complex structural belts.

Key words: attitude extraction; high-resolution remote sensing image; stereo image pair; edge extraction algorithm; remote sensing.

0 引言

地层产状信息获取是地质调查的基础工作和重要内容, 通常采用传统的野外地质调查方法, 但

在一些地势高陡、人迹罕至、构造复杂的地区, 野外地质数据收集工作非常困难. Philipson(1960)提出了利用航片来测量产状的方法, 朱亮璞(1994)对利用航片提取地层产状的方法进行了总结, 包括目视

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41372205).

作者简介: 林楠(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感地质研究. ORCID: 0000-0003-0145-4576. E-mail: 21838012@zju.edu.cn

* 通讯作者: 陈宁华, ORCID:0000-0001-9401-9711. E-mail: geo316@zju.edu.cn

引用格式: 林楠, 徐遥辰, 高博文, 等, 2021. 基于边缘提取算法的岩层三角面产状半自动提取. 地球科学, 46(10):3753-3763.

估算法和立体模型测量法,此外还存在地形地质图法和线性投影图解法等,这些方法都较繁琐且受主观因素影响大,效率不高(刘华国等,2011;柳潇等,2020;宋博文等,2020)。

随科学技术的发展,高分辨率遥感影像、数字高程模型(digital elevation model, DEM)及数字摄影测量等多种技术手段结合的方法在地学领域量化研究中得到广泛应用。Berger *et al.*(1992)利用 SPOT 卫星立体像对进行了地表地层产状提取的研究;Bilotti *et al.*(2000)基于 SPOT 卫星影像、DEM 和地震反射数据,对安第斯山脉地区进行构造建模;陈宁华等(2007)利用解密的 CORONA KH-4B 卫星立体影像和 JXC 数字摄影测量系统,提取南天山库车前陆褶皱冲断带的地表产状,结合地区地震反射资料进行构造定量分析;Cracknell *et al.*(2013)使用机载 LiDAR 数据生成的高分辨率 DEM 对澳大利亚塔斯马尼亚岛东北部的褶皱沉积岩进行半自动产状提取,得到准确的倾向估计;Vasuki *et al.*(2013)使用无人机数据,通过自动图像分析技术和专家辅助解译实现岩层结构面的客观可重复半自动解译;金谋顺等(2015)利用 ArcGIS 软件和 Worldview-2 影像对东昆仑地区断层、断面产状等构造信息进行了解译;郭啟倩等(2016)基于 Google Earth Plug-in 嵌入三维地图服务,开发了断层在线解译和产状测量平台;Foroutan and Zimbelman (2017)使用 SOM(Self-Organizing Maps)算法对地球和火星的高分卫星影像进行线性趋势地层识别的机器学习,识别准确率达到 98%;桑学佳(2018)提出采用无人机、影像数据建模和人工智能技术改善地质调查过程的方法与流程,提出了基于无人机影像识别地质体的 SLIC-CNN 方法,自动填图准确率达 88.7%。

面对遥感手段收集的海量数据,影像分析方法从人工划线、取点、判别转变为使用机器学习进行半自动、自动信息解译和提取。原本需要花费数小时手动操作进行人工解译的遥感影像仅需几分钟就能够完成半自动解译,且解译的结果是客观可重复、不受主观因素影响的。然而有监督的机器学习方法需要大量学习样本,聚焦于图像特征分类提取的研究缺乏后续实际应用,量化地学信息提取仍然较依赖手工选点。基于上述问题,本文通过自动迭代消除噪声线条的 Canny 边缘检测算法(Canny, 1986),提出基于边缘检测算法的岩层三角面半自

动检测和地层产状快速提取方法。本文以南天山吐格爾明背斜为实验区,使用高分辨率遥感影像 Worldview-2 立体像对,基于开源 GIS 软件 QGIS 插件平台,在 PyQt 环境下利用 Python 语言开发了一套可实现岩层三角面产状信息提取的插件,并对研究区三角面使用本文提出的方法和人工解译进行数据提取对比,验证了本文方法的有效性。

1 岩层三角面产状提取方法

岩层三角面指倾斜岩层受侵蚀切割形成的三角状岩层面,在遥感影像上表现为同一层面的露头线上任一山脊点和相邻两沟谷之间用直线相连构成的三角平面,能够指示褶皱构造的形态。遥感影像中,岩层三角面以光谱纹理信息形式存在,通过像素值分布变化表现,边缘检测算法能够有效定位这些变化。其中 Canny 算法不易受噪声干扰,能够通过不同阈值检测出强弱边缘,符合遥感影像中复杂地物线条的识别需求。通过 Canny 算法定位岩层三角面的平面坐标,结合 DEM 的空间信息能够为产状信息提供数据支持。

本文在传统遥感影像使用三点、多点法提取地层产状信息的基础上,使用 Canny 边缘检测算法,通过自动迭代调整高斯分布模型方差 σ 消除噪声信息干扰,对岩层三角面地层界线进行提取,结合 DEM 进行地层面拟合和产状计算。具体流程包括点位选取、边缘识别、线条点整合评估、平面拟合、产状计算等模块,具体流程如图 1 所示。

1.1 建立三维地表模型

利用立体像对建立 DEM 是指根据重叠影像匹配特征点推导出该点的三维坐标,并构建空间立体模型获取地物的三维信息。通过包含物方坐标和像方坐标的有理函数模型的有理多项式系数(rational polynomial coefficient, RPC)文件,能够将地面点坐标与像对坐标用比值多项式关联起来,最终解算出地面点坐标(杨海波等,2016)。通过对立体像对进行相对定向、绝对定向、自动匹配同名点和空中三角测量计算误差并调整连接点位置后,获得高密度的 las 格式点云文件,对点云进行滤波和插值,能够得到高分辨率的 DEM。

多光谱影像的地物光谱信息丰富,纹理特征明显,使用影像融合技术,将多光谱影像与全色影像融合,能够将影像分辨率提高至全色影像分辨率,同时保留丰富的光谱纹理信息。基于 DEM 对融合

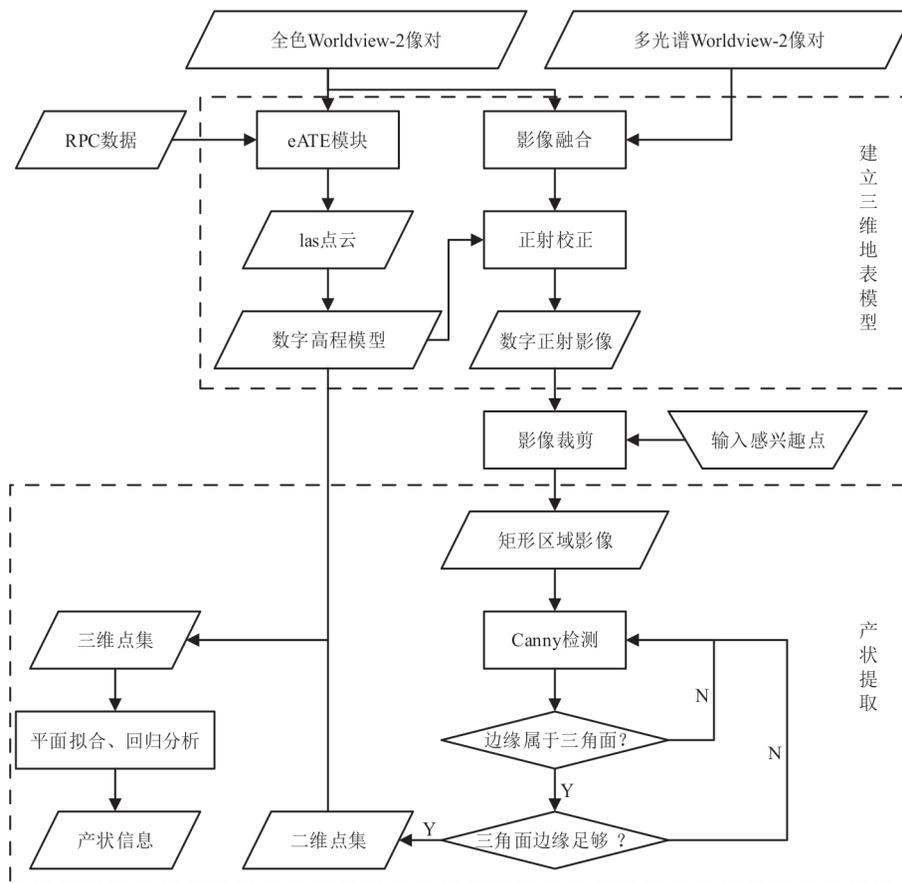


图1 基于边缘检测算法和高分辨率立体像对的地质三角面产状提取方法总流程

Fig.1 The flow chart of facet attitude extraction of stratigraphic triangle based on edge extraction algorithm and high-resolution remote sensing stereo pair

影像进行正射校正,消除由地形因素导致的影像地物变形.将DEM与正射影像叠加,得到具备光谱纹理信息和空间信息的三维地表模型.

1.2 岩层三角面边缘提取

大范围遥感影像中的地层、地形信息复杂,对其进行无差别识别不仅分散提取目标、模糊提取条件,还会对计算机运算资源造成浪费,将三角面提取复杂化.传统地学研究方法中“点—线—面”的研究思路同样适用于使用遥感影像进行信息提取,即由研究者选择目标三角面,对三角面区域一定范围内的栅格影像进行重采样,获取小范围矩形栅格影像并用于三角面产状信息提取.该方法具备目标性强、提取快速、适配地学信息特征等优点.

本文采用Canny边缘检测算法提取三角面地层界线信息.Canny算法主要分为5个步骤:图像灰度化、高斯滤波、计算梯度值和方向、非极大值抑制、双阈值选取与边缘连接.图像灰度化能够统一像素值计算标准;高斯滤波对图像进行平滑处理消除噪声;计算梯度值和方向通过灰度差计算梯度方向得

出与梯度方向垂直的边缘方向;非极大值抑制提取出图像中的最大梯度值;双阈值选取根据非极大值抑制的结果定义高低阈值后,为高于高阈值的点赋予强边缘,并将强边缘通过高于低阈值的弱边缘点以八邻域追踪算法连通.其中 σ 为高斯滤波步骤中的高斯分布模型方差,通过调整 σ 能够调整滤波窗口的大小与加权平滑权重,从而影响Canny算法提取边缘线条的数量、长度和平滑度等,迭代调整合适的 σ 能够消除噪声信息,获取图像中显著的线条边缘(图2).

在三角面区域影像中,显著的边缘线条主要属于三角面地层界线,少量属于阴影线、地形线、风化纹理和沉积物边界线等(图2).Canny算法提取得到的“边缘信息”实际为一系列相连的栅格点,并非目视理解的线条,为降低交互复杂度,通过线条端点数量判定线条数量,自动迭代高斯分布模型方差 σ ,输出当前图像中的最显著边缘线条(图3),并由人工交互判断线条是否属于目标三角面边缘,对边缘线条的栅格点进行记录或消除,经过数次识别和筛

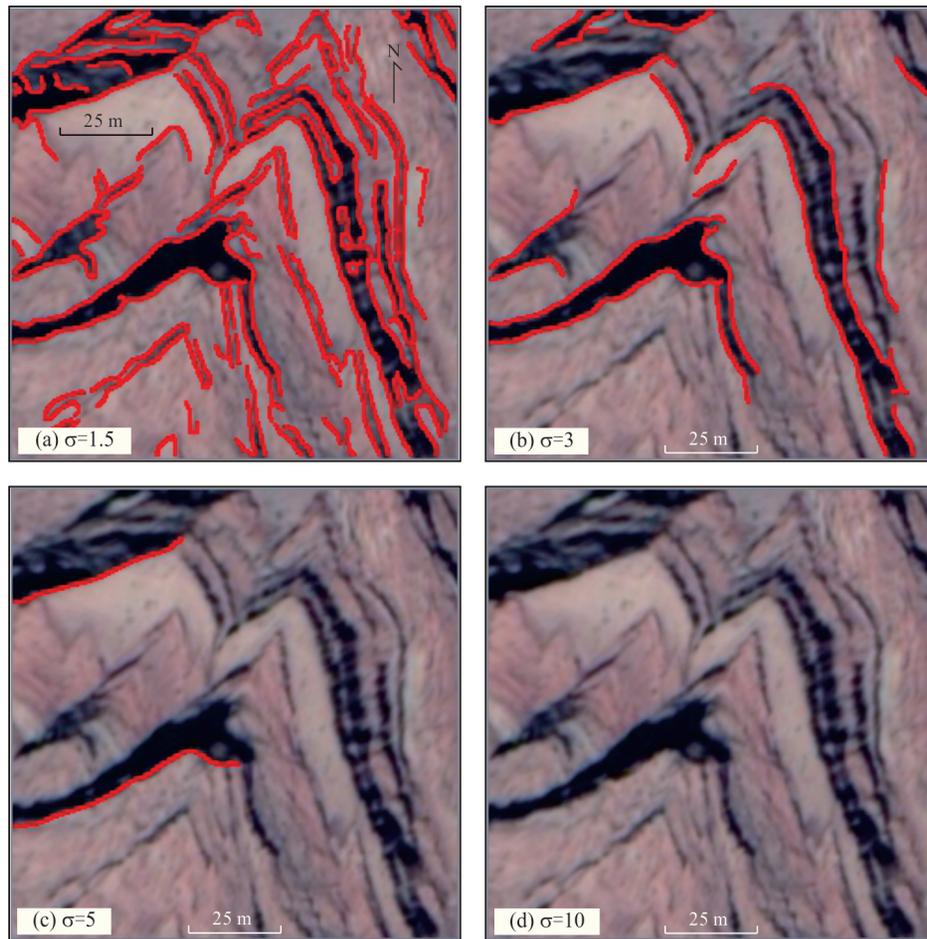


图 2 不同高斯分布模型方差 σ 对边缘检测的影响

Fig.2 Influence of different Gaussian distribution model variances σ on edge detection

红色线条表示边缘

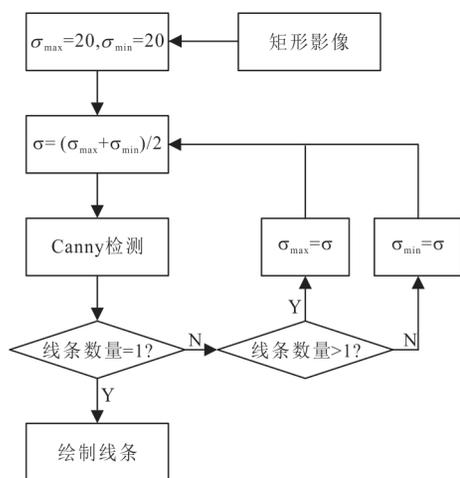


图 3 自动迭代调整 σ 流程图

Fig.3 Flow chart of automatic iterative adjustment of σ

选即可提取出较完整的岩层三角面边缘.若检测线条构成封闭图形或可能无限迭代,则跳过检测并消去影像矩阵中的相关线条.

对多次检测得到的边缘线条进行筛选,前人在激光点云数据和无人机数据中提取包含噪声的地层面、结构面线条,使用模糊群聚分析和随机抽样一致性方法对三维坐标点进行平面拟合,经过精细的参数和阈值调整后能够较准确地提取出数个拟合面(刘昌军等,2011; Chen *et al.*, 2015).本文选用遥感影像作为数据源,垂直分辨率难以达到上述分析方法的使用需求,选择通过人工判断线条是否选用.由于选取重采样点位时已经选定目标三角面,因此仅需判定提取线条是否属于该三角面的同一地层界线.此外,当目标三角面存在大面积地层面出露时,也可以通过层面线条坐标提取层面产状信息.

调整 σ 改变滤波窗口,平滑图像消除噪声并突出关键信息,人工为提取线条和地层界线建立匹配关系,对提取线条进行整合,能够获得岩层三角面的单一地层界线.边缘识别线条在栅格层面呈现为

双层锯齿状线条,通过 8 邻域跟踪算法调整为单层线条.将线条栅格点的公里网坐标代入 DEM,得到提取点的三维坐标.

1.3 地层面拟合与产状提取

本文使用的平面拟合方法为最小二乘法,由于边缘线条经过人工判别后准确率较高,使用最小二乘法能够满足拟合需求,拟合的空间平面方程可表示为:

$$Z = a_0X + a_1Y + a_2, \quad (1)$$

式中: X 、 Y 、 Z 是拟合平面上任意一点的三维坐标, a_0 、 a_1 、 a_2 为平面拟合参数,对 n 个点使用最小二乘法进行平面拟合.由于岩层三角面的小范围地层界面近似为一个平面,高程值应与公里网横纵坐标强相关,对数据点进行回归分析能够判断三维数据点的数据质量,回归分析公式如下:

$$S_E = \sum_{i=1}^n (Z_i - \hat{Z}_i)^2, \quad (2)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2, \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - S_E/S_T, \quad (4)$$

式中: X_i 、 Y_i 、 Z_i 是三维点集内 i 点对应的三维坐标, \hat{Z}_i 是 X_i 、 Y_i 在拟合平面上对应的高程值, \bar{Z} 为 Z_i 的均值, S_E 为残差平方和, S_T 为总离差平方和, n 为样本数量, R^2 为回归分析决定系数.决定系数 R^2 反映因变量能被自变量解释的比例.若决定系数 R^2 较低,则说明提取过程中存在数据误差或人工误判,提取线条不可用.

一般认为决定系数 $R^2 > 0.7$ 为强相关,但三角面的边缘点高程值与横纵坐标在理想情况下应为

完全相关,因此需要通过实验确定合适的决定系数,满足决定系数条件的拟合平面能够用于进行产状计算,基于空间平面方程(1),可得:

$$\theta_{dip} = \arctan \left(\sqrt{a_0^2 + a_1^2} \right), \quad (5)$$

$$\theta_{dipdirection} = \begin{cases} \arctan \left(\frac{a_0}{a_1} \right) & a_0 \leq 0, a_1 < 0 \\ \arctan \left(\frac{a_0}{a_1} \right) + 360^\circ & a_0 > 0, a_1 < 0 \\ \arctan \left(\frac{a_0}{a_1} \right) + 180^\circ & a_1 > 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\theta_{dipdirection}$ 是拟合平面的倾向, θ_{dip} 为拟合平面的倾角,通过公式(5)和(6)能够获取拟合平面的产状信息.

2 结果与精度分析

为验证本文提出方法的有效性,实验选取南天山吐格尔明背斜为研究区(图 4),基于开源 GIS 软件 QGIS,使用 Python 语言编写插件实现本文提出的半自动方法,对研究区内的三角面分别使用本文的方法和目视解译提取产状进行对比验证.

研究区范围为 $84^\circ 14'50''E \sim 84^\circ 32'50''E$, $42^\circ 05'50''N \sim 42^\circ 12'14''N$,位于塔里木盆地北缘,库车前陆褶皱冲断带东部.吐格尔明背斜呈北西西—南东东向,背斜东段呈东—西向,西段呈北西—南东向,构造形态完整,背斜北翼三叠系至第四系均有发育,存在地层尖灭和不整合接触现象,南翼缺失中

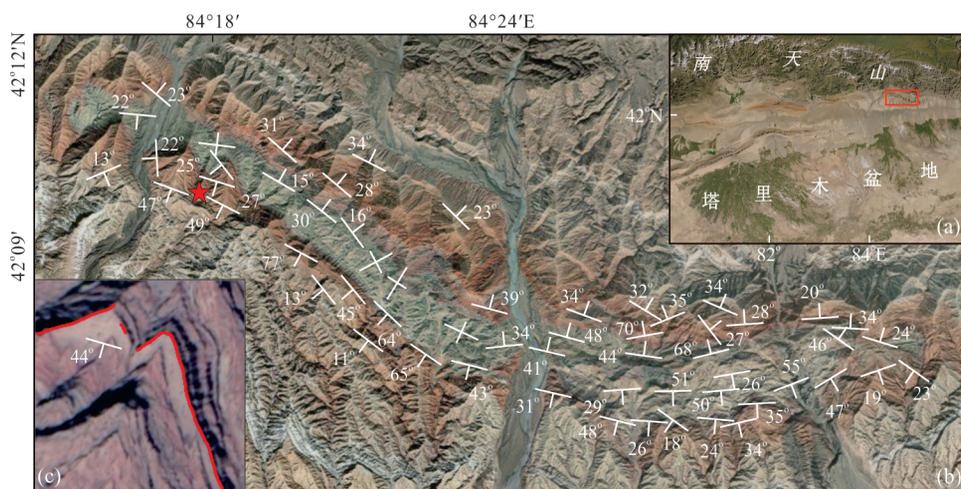


图 4 研究区概况

Fig.4 Overview of the study area

a. 研究区地质背景,红色方框为图 4b 的研究区位置;b. 研究区影像和本文方法提取的产状标注,红星位置为图 4c;c. Worldview-2 影像上的三角面示意图

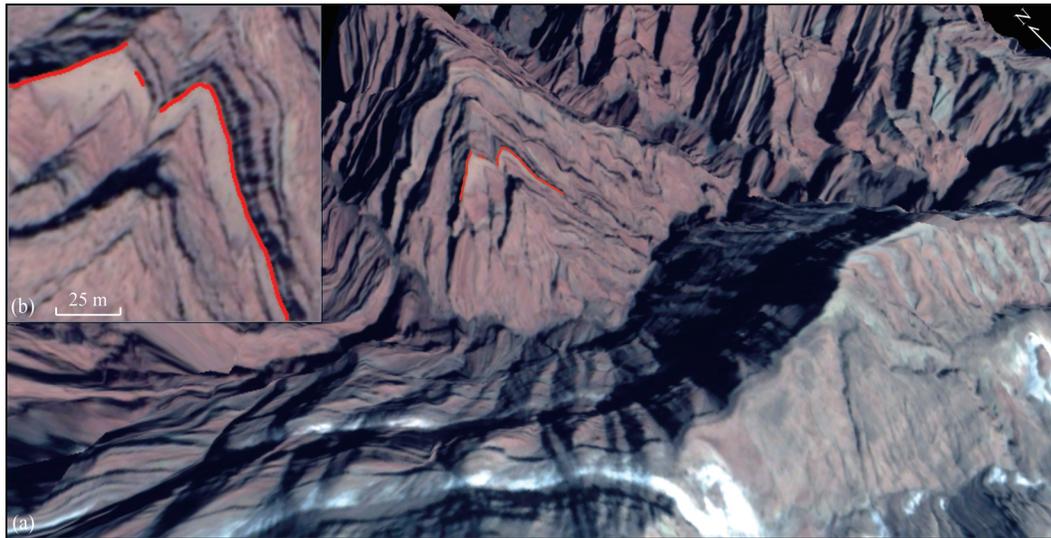


图5 地层三角面产状提取实例(位于图4b红星区域)

Fig.5 An example of the attitude extraction, the triangular facet located in the red star in Fig.4b

a. 地层三角面边缘提取三维视图; b. 边缘提取展示窗口

侏罗统上部至古近系(何登发等, 2011). 研究区地表地层产状变化明显, 无植被覆盖, 小型三角面清晰且数量较多, 适合使用高分辨率遥感影像进行实验验证.

2.1 三维地表模型建立

本文采用两对4景无云覆盖的Worldview-2卫星全色波段立体像对(表1)及对应多光谱影像, 其中全色影像分辨率为0.5 m, 多光谱影像分辨率为2 m. 由于研究区交通不便, 地形起伏大, 未获取外业地面控制点, 前人研究表明, 使用卫星自带的表示有理函数模型的RPC文件在无外业控制点的情况下也能提取高精度DEM, 并在一些研究中得到应用(丁辉和姚安强, 2012). 其中Worldview-2影像提取出的DEM平面精度较高(王蕾, 2016), 汪思好等(2018)基于Worldview-2立体像无地面控制点提取DEM, 与12个地面实测点的高程均方根误差为1.82 m, DEM测线与DGPS测线偏差范围在-2.82~4.87 m, 且陡坎高度等相对高差的误差更小, 偏差范围仅为-0.36~-0.09 m. 虽然山区地

形起伏会导致DEM的精度降低, 但对于研究区大部分数十米高的岩层三角面, 基于立体像对制备的DEM已经能够满足产状提取需求.

本文使用的两景像对能够对研究区进行完整覆盖, 由于记录影像时传感器姿态、位置不同, 不能够直接对影像进行拼接处理, 需要对两景像对分别建立三维地表模型后再进行拼接. 本文使用Erdas 2015 LPS平台的eATE模块工作流程进行DEM提取工作, 影像投影方式选择UTM投影, 投影坐标系选择WGS84. eATE模块工作流程的空中三角测量迭代次数设置为10次, 东像对均方根误差为0.206 6像素, 西像对均方根误差为0.129 3像素, 误差均控制在1像素内. 设置阈值对点云进行分类, 滤波保留地形点后, 根据连续张力样条法插值生成0.5 m分辨率的DEM. 使用GS(Gram-Schmidt Pen Sharpening)图像融合方法对真彩色合成影像和全色影像进行影像融合, 融合影像分辨率为0.5 m, 经过正射校正、影像拼接和叠加显示后, 得到三维地表模型, 如图5a所示.

表1 立体像对元数据信息表

Table 1 The metadata information of the stereo-imagery

	文件名	行数	列数	成像时间	太阳高度角	太阳方位角	传感器高度角	传感器方位角	云量
东左像	18OCT01053450	24 568	15 948	2019-10-10T11:42:13	44.1°	167.1°	67.5°	355°	0
东右像	18OCT01053617	24 568	15 948	2019-10-10T11:40:24	44.2°	167.6°	63.6°	211.8°	0
西左像	18SEP18051308	28 360	25 836	2019-10-10T11:42:51	47.4°	156°	58.2°	71.4°	0
西右像	18SEP18051322	28 360	25 836	2019-10-10T11:40:57	47.5°	156.5°	55.2°	140.4°	0

2.2 地层产状提取

研究区内发育大量尺寸近百米的岩层三角面,使用本文提出方法对岩层三角面进行产状提取,增大裁剪窗口获取完整的岩层三角面能够有效减小相对误差,但同时将增加计算机后续识别处理的时间,降低工作效率.插件使用GDAL工具对点位附近 240×240 像素单元的影像(图5b)进行重采样,并将重采样影像导入插件展示窗口,用于进行Canny边缘线条识别,在Inter(R) Core(TM) i5-2310 CPU @ 2.90GHz处理器,8 GB内存的计算机配置条件下每次输出边缘线条耗时约2 s,能够满足降低相对误差的需求且处理时间较短.依据1.2描述的方法获取地层界线点(图5b)的三维坐标,对三维坐标点集进行回归分析,使用公式(2)、(3)、(4),计算得决定系数 R^2 为0.97.这表明高程与横纵坐标具备强相关性,符合地层界线拟合地层面的实际情况,数据误差较小,能够使用最小二乘法进行平面拟合(图6a).点位高程与对应拟合面高程的误差值分布如图6b,共提取边缘点710个,其中约82%的数据点分布在拟合平面高程值 ± 4.5 m范围内,不足1%的数据点与拟合平面的高程差超过10 m,误差产生的主要原因是建立DEM过程中影像阴影区像点匹配生成的点云密度不足,DEM插值生成小范围地形失真.对该三角面使用本文方法拟合的产状为 $197^\circ \angle 44^\circ$,人工解译产状为 $200^\circ \angle 46^\circ$,产状结果接近.

2.3 区域产状提取分析

使用本文提出的方法在研究区内选取81个三

角面进行产状提取并记录产状数据和决定系数.背斜北翼西段三角面个体较大且风化和沉积物覆盖严重,大量风化纹理干扰了地层界线的提取,只能利用部分出露较好的层面提取产状;背斜北翼东段岩层三角面发育良好,适用于半自动检测方法;背斜南翼的岩层三角面清晰,地表几乎无沉积物覆盖,风化痕迹较少,提取线条误判较少,易于提取.由于研究区吐格尔明背斜岩层三角面发育程度存在差异,分别在南北两翼提取了48个和33个岩层三角面.图7显示了提取的典型岩层三角面以及数据点的决定系数和拟合产状.

对人工解译产状和拟合产状分别绘制极射赤平投影密度图(图8).图8a为人工解译产状极射赤平投影密度图,由于对三角面进行过适当延伸以减小相对误差,产状信息中较少出现倾角非常小的点位.图8b为拟合产状的极射赤平投影密度图,其中数个点位的三角面倾角极小,易受高程分辨率的影响,倾向拟合误差较大,这解释了图9中存在2种方法提取倾角差距达到近 110° 的情况,这些点位的岩层三角面均近水平,主要位于褶皱西段背斜核部的近水平地层.

对比图8a与图8b,去除倾角较小的点位后,两图的产状分布规律相似,图8a在北翼的部分褶皱东西两段产状区分更明显,图8b则在背斜南翼高中低倾角的体现上更明显.图8a中也存在少数向南高角度倾伏的三角面点位.结合图4的点位分布和拟合产状分布可得,这些集中区域分别对应背斜两翼东西两段4块区域的产状,向南的低角度倾伏和中等

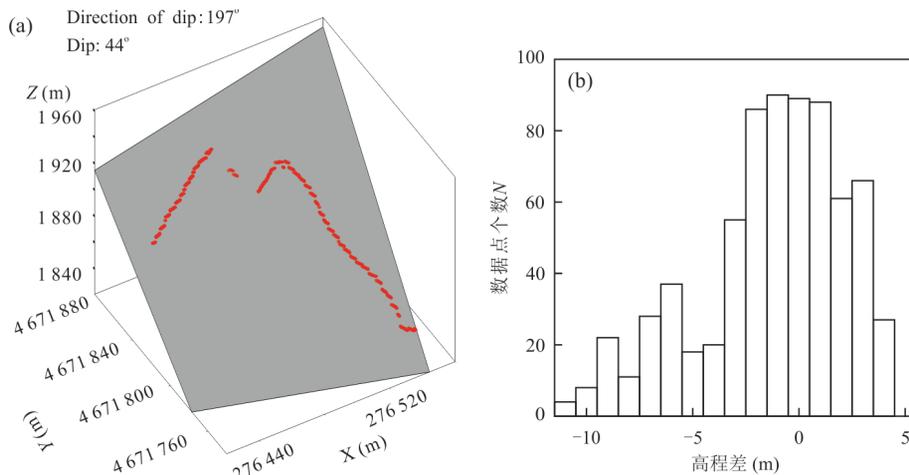


图6 平面拟合实例

Fig.6 Plane fitting example

a. 基于提取三维坐标点集拟合产状面;b. 数据点与拟合平面的高程差分布直方图

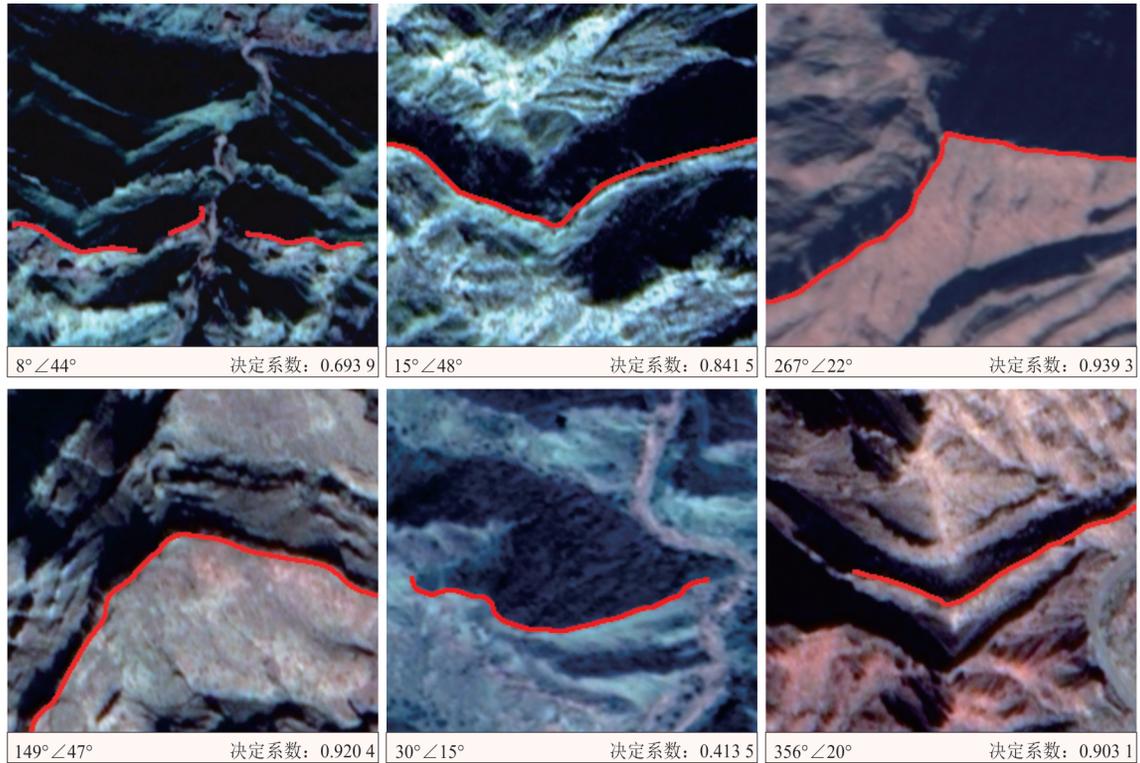


图 7 研究区典型三角面

Fig.7 The typical triangular facet of the study area

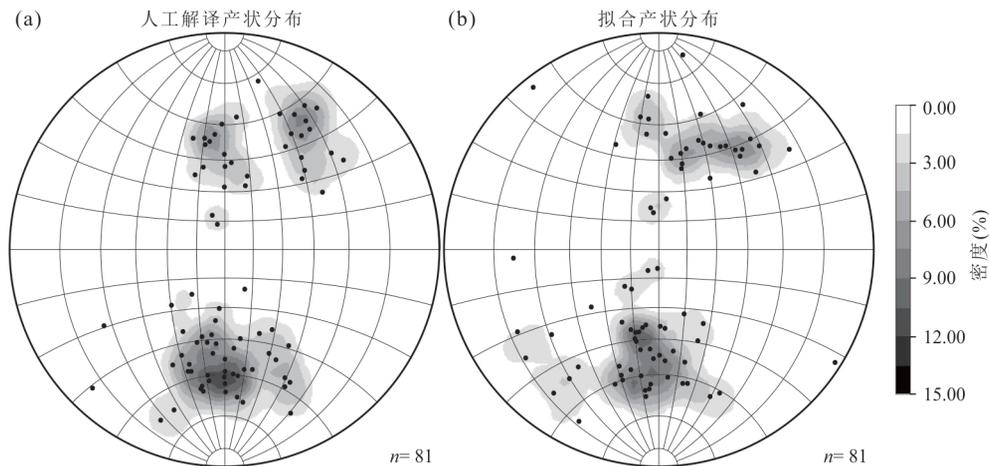


图 8 人工解译产状和拟合产状的极射赤平投影密度图

Fig.8 Stereographic comparisons of pole-to-plane of manually extracted attitude and semi-automatic extracted attitude

角度倾伏对应背斜东段南翼和核部的地层产状.此外,还存在少数向南西倾伏的高角度倾伏点位和低角度倾伏点位,这代表了褶皱西段南翼的不整合接触现象和高高隆起的近直立地层;少数向北高角度倾伏的产状点位于褶皱东段北翼的近核部地层,靠近背斜核部与断层可能是这些近直立地层出现的原因.

将本文半自动提取方法得到的产状与人工提

取的岩层三角面产状进行对比,对倾向和倾角绘制散点图(图9).散点图横轴代表人工解译产状,纵轴代表本文方法的拟合产状,45°倾斜的黑色实线代表两种方法得到的结果相同,倾向散点图(图9a)的虚线代表角度差为20°,倾角散点图(图9b)的虚线代表角度差为10°,3种符号代表该点位提取线条的决定系数 R^2 ,空心圆表示 $R^2 > 0.9$ 的点位,三角形表示 $0.7 < R^2 < 0.9$ 的点位,叉号代表表示 $R^2 < 0.7$ 的点

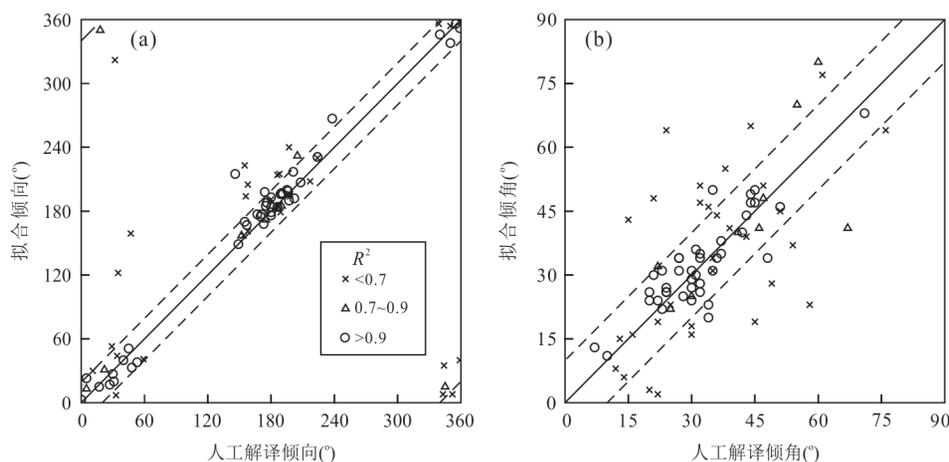


图9 人工解译产状—拟合产状对应图

Fig.9 Manual interpreted attitude versus fitted plane attitude

倾向图虚线代表±20°误差,倾角图虚线代表±10°误差,符号代表该点提取线条的决定系数

位.由于存在拟合倾向与人工提取倾向恰好位于0°两侧的情况,倾向散点图(图9a)中,角度误差小于20°的区域还包括左上角和右下角虚线范围.

图9中,大部分三角面的对应点落在虚线范围内和附近,极少数点误差较大.其中几乎所有空心圆点位($R^2 > 0.9$)均位于虚线范围内或附近,这表明 $R^2 > 0.9$ 的点位产状误差极小.大部分三角形点位($0.7 < R^2 < 0.9$)的产状误差较小,接近一半的叉号点位($R^2 < 0.7$)产状误差较大,其中最大的倾向误差达到近110°.决定系数代表该点位提取边缘点的平面相关程度,低决定系数点位的拟合平面无法代表产状面,因此在方法应用中选择 $R^2 > 0.9$ 的点位产状作为采纳标准.与人工提取产状进行对比,以倾向误差小于20°,倾角误差小于10°作为本文产状提取准确率的判别标准,本文方法的产状提取准确率达到90.2%,能够作为精细构造分析的依据.

对上述产状误差超过虚线范围的点位数据进行检查,得到以下几种误差产生的原因:(1)三角面地层界线提取得到的两翼线条夹角过大,超过150°甚至接近共线,线条夹角过大导致虽然提取点的决

定系数较高,但拟合平面产状误差较大;(2)坡面阴影覆盖降低立体像对提取的点云密度,过多插值导致DEM误差明显增大,提取边缘线条的 R^2 较低;(3)地层面倾角较小或近水平时,受DEM精度及垂直分辨率限制,岩层三角面的倾向误差较大(图8b);(4)存在1个点位在人工解译过程中为减小相对误差延伸三角面地层时,地层线错误延伸,人工解译出现误判.

上述(1)与(4)两种情况为人工判断失误,对产状提取效果产生影响的主要因素为地形阴影和DEM精度.其中地形阴影包括大范围的坡面阴影及小范围的地层高差阴影2类:大型坡面阴影由于DEM提取过程中仅产生大范围的低密度点云,提取的DEM缺乏信息约束精度较低,产状提取得到的数据回归分析结果往往不佳,易出现较大产状误差;小范围的地层高差阴影对于提取点云密度的影响较小,且由于易被算法提取(图7),实际上对于本文的产状提取方法具有积极作用.

绘制图7中提取产状信息为30°∠15°的近水平岩层三角面的边缘点高程及与拟合面的高差(图

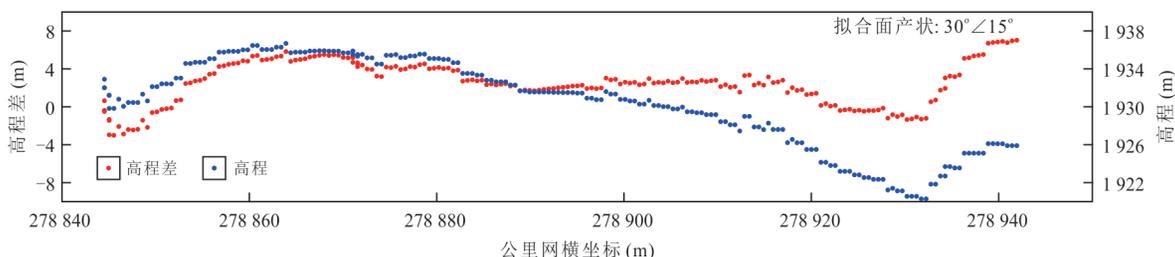


图10 近水平岩层面边缘点的高程及与拟合平面的高程差

Fig.10 Elevation of the edge points of the rock triangular facet, and the elevation difference with the fitted plane

10). 与图 6 的边缘点—拟合面高差分布接近, 近水平岩层面与拟合平面的高差主要分布在 ± 4.5 m 范围内, 但由于岩层面接近水平, 三角面边缘的地形高差不足 20 m, 图 10 中东西两侧明显的高程误差导致了回归分析决定系数的显著降低, 拟合产状仅具备表达岩层面近水平的参考价值, 可以使用随机抽样一致性算法来降低 DEM 误差带来的影响.

3 结论与展望

本文针对传统野外地质调查产状测量受野外条件限制大且人物力成本高、高分辨率遥感影像使用人工选点计算产状主观性强、复现性差和数据难以评估等问题, 在利用 Worldview-2 遥感影像立体像对建立三维地表模型的基础上, 提出了使用 Canny 边缘检测算法提取地层三角面地层界线, 拟合计算地层产状的方法. 该方法充分利用了三角面地层在高分辨率遥感影像上的纹理特征, 实现了三角面产状信息的半自动提取, 使产状信息的获取更加高效和客观.

通过对吐格爾明背斜地区的岩层三角面产状提取实验, 得出如下结论: (1) 本文提出的基于 Canny 算法的岩层三角面半自动提取和产状计算方法所得结果与人工解译结果接近, 准确率达到 90.2%, 能够展现褶皱构造的地层产状变化; (2) 本文提出的方法相较于传统野外地质调查能够节省大量人力物力, 与遥感影像人工“多点法”提取产状相比更具备客观性和数据判别能力, 能够避免由于人工误判导致的产状提取误差; (3) 使用本文提出的方法应避免选取呈现为大钝角三角形的岩层三角面进行产状提取, 使用遥感影像应尽量避免存在大范围坡面阴影, 小范围地层高差产生的阴影有助于算法提取三角面边缘; (4) 在地层倾角较小甚至接近水平时, 提取得到的产状误差可能较大, 仅能提供岩层面近水平的参考信息.

本文的产状提取方法主要基于 Canny 算法, 更换研究区或数据源仅需调整裁剪窗口等参数, 具备较好的适用性, 但对于纹理信息损失较多的中低分辨率影像难以开展产状提取工作. 此外, 在地表风化严重、地表沉积物覆盖的区域, 风化纹理和沉积物边缘会带来大量的识别噪声, 本文的方法同样难以适用. 由于实验采用的遥感影像数据精度有限, 对边缘线条进行人工判定难度较高, 仅能够实现产状信息的半自动提取, 后续可以尝试使用更高分辨率与配准精度的无人机影像数据, 结合随机抽样一

致性等算法法以期实现自动化和获得更加精确的产状提取结果.

References

- Berger, Z., Williams, T.H.L., Anderson, D.W., 1992. Geological Stereo Mapping of Geologic Structures with SPOT Satellite Data. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 76(1):101–120.
- Bilotti, F., Shaw, J.H., Brennan, P.A., 2000. Quantitative Structural Analysis with Stereoscopic Remote Sensing Imagery. *AAPG Bulletin*, 84(6):727–740. <https://doi.org/10.1306/a96733d8-1738-11d7-8645000102c1865d>
- Canny, J., 1986. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6): 679–698.
- Chen, N.H., Ni, N.N., Kapp, P., et al., 2015. Structural Analysis of the Hero Range in the Qaidam Basin, Northwestern China, Using Integrated UAV, Terrestrial LiDAR, Landsat 8, and 3-D Seismic Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(9): 4581–4591. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2440171>
- Chen, N.H., Wang, X., Yang, S.F., 2007. Quantitative Extraction of Shallow Stratum Information Based on CORONA Imagery. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 41(4): 662–667(in Chinese with English abstract).
- Cracknell, M. J., Roach, M., Green, D., et al., 2013. Estimating Bedding Orientation from High-Resolution Digital Elevation Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5): 2949–2959. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2217502>
- Ding, H., Yao, A. Q., 2012. DEM Generation and Analysis Using IKONOS Stereo Pairs. *Science of Surveying and Mapping*, 37(1): 179–181(in Chinese with English abstract).
- Foroutan, M., Zimbelman, J.R., 2017. Semi-Automatic Mapping of Linear-Trending Bedforms Using ‘Self-Organizing Maps’ Algorithm. *Geomorphology*, 293: 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.016>
- Guo, Q.Q., Li, S.L., Liu, Z.M., 2016. Platform of Online Interpretation and Attitude Measurement for Faults Using High Resolution Remote Sensing Image. *Remote Sensing for Land & Resources*, 28(1): 190–196(in Chinese with English abstract).
- He, D.F., Yuan, H., Li, D., et al., 2011. Chronology, Geochemistry and Tectonic Setting of Granites at the

- Core of Tugerming Anticline, Tarim Basin: Indications of Paleozoic Extensional and Compressional Cycle at the Northern Margin of Tarim Continental Block. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 133–146(in Chinese with English abstract).
- Jin, M.S., Wu, J.L., Chen, L., et al., 2015. Application of High-Resolution Remote Sensing Data Combined with 3D Approach Geological Investigation in the Eastern Kunlun Mountain Area. *Mineral Exploration*, 6(5): 609–614(in Chinese with English abstract).
- Liu, H.G., Ran, Y.K., Li, A., et al., 2011. Attitude Extraction of Shallow Stratum Based on P5 Stereo Images and GeoEye-1 Image. *Seismology and Geology*, 33(4): 951–962(in Chinese with English abstract).
- Liu, C.J., Ding, L.Q., Sun, D.Y., 2011. Automatic Fuzzy Clustering Analysis and Geometric Information Acquisition of Rock Mass Discontinuities Based on Laser Point Cloud Data. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(2): 358–364(in Chinese with English abstract).
- Liu, X., Lü, X.B., Wu, C.M., et al., 2020. Topographic Correction Method for High Spatial Resolution Remote Sensing Data in Mountainous Area. *Earth Science*, 45(2): 645–662(in Chinese with English abstract).
- Philipson, W. R., 1960. Manual of Photographic Interpretation. American Society for Photogrammetry, Washington D.C..
- Sang, X.J., 2018. Application of UAV and Deep Learning in Geological Survey: A Case Study of Xingcheng City in Liaoning and Beishan Area in Gansu Province(Dissertation). Jilin University, Changchun(in Chinese with English abstract).
- Song, B.W., Zhang, K.X., Xu, Y.D., et al., 2020. Paleogene Tectonic-Stratigraphic Realms and Sedimentary Sequence in China. *Earth Science*, 45(12): 4352–4369 (in Chinese with English abstract).
- Vasuki, Y., Holden, E.J., Kovesi, P., et al., 2013. A Geological Structure Mapping Tool Using Photogrammetric Data. *ASEG Extended Abstracts*, 1–4. <https://doi.org/10.1071/ASEG2013ab144>
- Wang, L., 2016. DEM Extracted by Stereo Images of High Resolution Satellite and Accuracy Analysis in Plateau (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Wang, S.Y., Ai, M., Wu, C.Y., et al., 2018. Application of DEM Generation Technology from High Resolution Satellite Image in Quantitative Active Tectonics Study: A Case Study of Fault Scarps in the Southern Margin of Kumishi Basin. *Seismology and Geology*, 40(5): 999–1017(in Chinese with English abstract).
- Yang, H.B., Yang, X.P., Huang, X.N., et al., 2016. Data Comparative Analysis between SFM Data and DGPS Data: A Case Study from Fault Scarp in the East Bank of Hongshuiba River, Northern Margin of the Qilian Shan. *Seismology and Geology*, 38(4): 1030–1046(in Chinese with English abstract).
- Zhu, L.P., 1994. Geology Remote Sensing. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈宁华, 汪新, 杨树锋, 2007. 基于 CORONA 影像的浅层地层信息定量提取. 浙江大学学报(工学版), 41(4): 662–667.
- 丁辉, 姚安强, 2012. 利用 IKONOS 立体像对提取 DEM 精度的实验. 测绘科学, 37(1): 179–181.
- 郭啟倩, 李盛乐, 刘珠妹, 2016. 断层高分辨率遥感在线解译及产状测量平台. 国土资源遥感, 28(1): 190–196.
- 何登发, 袁航, 李涤, 等, 2011. 吐格尔明背斜核部花岗岩的年代学、地球化学与构造环境及其对塔里木地块北缘古生代伸展聚敛旋回的揭示. 岩石学报, 27(1): 133–146.
- 金谋顺, 吴君丽, 陈玲, 等, 2015. 高分遥感数据结合三维技术在东昆仑地区地质调查中的应用. 矿产勘查, 6(5): 609–614.
- 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚, 2011. 基于激光点云数据的岩体结构面全自动模糊群聚分析及几何信息获取. 岩石力学与工程学报, 30(2): 358–364.
- 刘华国, 冉勇康, 李安, 等, 2011. 基于 P5 像对与 GeoEye-1 影像的近地表地层产状的提取. 地震地质, 33(4): 951–962.
- 柳潇, 吕新彪, 吴春明, 等, 2020. 面向高空间分辨率遥感影像的山区地形校正方法. 地球科学, 45(2): 645–662.
- 桑学佳, 2018. 无人机及深度学习在地质调查中的应用(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 宋博文, 张克信, 徐亚东, 等, 2020. 中国古近纪构造—地层区划及地层格架. 地球科学, 45(12): 4352–4369.
- 王蕾, 2016. 高原地区高分辨率卫星立体像对提取 DEM 及精度分析(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 汪思好, 艾明, 吴传勇, 等, 2018. 高分辨率卫星影像提取 DEM 技术在活动构造定量研究中的应用: 以库米什盆地南缘断裂陡坎为例. 地震地质, 40(5): 999–1017.
- 杨海波, 杨晓平, 黄雄南, 等, 2016. 移动摄影测量数据与差分 GPS 数据的对比分析: 以祁连山北麓洪水坝河东岸断层陡坎为例. 地震地质, 38(4): 1030–1046.
- 朱亮璞, 1994. 遥感地质学. 北京: 地质出版社.