

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.351>



基于 Sentinel-1 和 DEM 数据的南岭高植被覆盖区 地形线性特征提取方法

鲁泽恩¹, 田玉刚^{1*}, 柳庆威¹, 王 晶^{2,3}, 朱 宁^{2,3}, 徐亚东^{2,3}

1. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 流域关键带演化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 在南岭高海拔山脉、植被茂密等地区开展地质调查难度大, 人员和物资难以进入, 因此需提前根据该区域的地形线性特征合理设计野外调查路线; 此外地形线性特征可为区域构造运动信息的认知提供辅助知识. 遥感技术以其宏观性、多尺度、多层次的特点成为地质研究和地质勘查的重要手段, 然而在高植被覆盖区, 常见的光学影像难以穿透植被, 而微波雷达遥感则因为较好的植被穿透性, 使得其应用成为可能. 因此, 提出了一种基于雷达卫星 Sentinel-1 和数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据的地形线性特征提取方法. 该方法首先利用似然比边缘检测算法提取 Sentinel-1 影像中的边缘特征, 然后对 DEM 进行线性特征增强以生成山体阴影影像, 再利用 Canny 边缘检测算子提取 DEM 数据中的山脊线与山谷线等主要线性特征, 以 DEM 提取出的特征线为中心建立缓冲区并与雷达影像的提取结果做相交处理, 将得到的线性特征利用道格拉斯-普克算法进行局部直线拟合, 最后得到研究区的地形线性特征. 结果表明, 该方法综合考虑了雷达影像的微观细节信息和 DEM 数据的宏观趋势信息, 在保留主要线性地形特征的同时剔除了伪边缘和噪声点, 提取效果较好.

关键词: 雷达卫星; 数字高程模型; 南岭; 高植被覆盖区; 线性特征; 遥感.

中图分类号: P237

文章编号: 1000-2383(2021)04-1349-10

收稿日期: 2020-10-06

Topographical Linear Feature Extraction Method Based on Sentinel-1 and DEM in Areas with High Vegetation Coverage of Nanling

Lu Zeen¹, Tian Yugang^{1*}, Liu Qingwei¹, Wang Jing^{2,3}, Zhu Ning^{2,3}, Xu Yadong^{2,3}

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

3. Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, Wuhan 430074, China

Abstract: Geological surveying is challenging in high-altitude mountains with dense vegetation in Nanling because it is inaccessible both for human and material resources. It is necessary to design reasonable field survey routes in advance according to the topographical linear characteristics of the area. Moreover, the topographical linear characteristics can provide the auxiliary information for local tectonic movement. Remotely sensed technology has become an important method for geological research and geological survey due to its macroscopic, multi-scale and multi-level characteristics. However, in areas with high vegetation coverage, optical remote sensing images are difficult to penetrate vegetation, while microwave radar images can do because of its

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (No. DD20190811).

作者简介: 鲁泽恩 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事资源与环境遥感研究. ORCID: 0000-0003-3308-6990. E-mail: lze@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 田玉刚, E-mail: yugangtian@cug.edu.cn

引用格式: 鲁泽恩, 田玉刚, 柳庆威, 等, 2021. 基于 Sentinel-1 和 DEM 数据的南岭高植被覆盖区地形线性特征提取方法. 地球科学, 46(4): 1349-1358.

good vegetation penetration. Therefore, the topographical linear feature extraction method based on Sentinel-1 (radar satellite) and DEM data in areas with high vegetation coverage is proposed. This method first uses the likelihood ratio edge detection algorithm to extract the edge features in Sentinel-1 images. Then, the linear features of DEM are enhanced to generate mountain shadow images, and then the main linear features such as ridge lines and valley lines are extracted by Canny edge detection operator. Finally, taking the feature line extracted from DEM as the center, a buffer zone is established and intersected with the result from radar images, and then the local straight line fitting is done by using the Douglas-Puck algorithm to obtain the final topographical linear features in the study area. The results show that the proposed method comprehensively considers the micro-detail information of radar images and the macro-trend information of DEM data, and can remove false edges and noise points while retaining the main topographical linear features, and the extraction effect is good.

Key words: Sentinel-1; digital elevation model; Nanling; high vegetation coverage; linear feature; remote sensing.

0 引言

地质调查经历着由易到难、由浅入深的过程。在地质条件复杂、人员难以进入的区域开展地质调查的难度很大,尤其是高海拔山脉地区、植被茂密地区等,气候恶劣、道路不通,野外工作难以开展。遥感以其宏观性、多尺度、多层次的特点成为地质研究和地质勘查的重要手段,区域地质调查和矿产勘查也成为遥感技术应用的领域之一,在遥感地质解译中发挥着重要作用(王润生等,2011;郑鸿瑞等,2018;胡官兵等,2019;柳潇等,2020)。在人工开展地质调查难度较大的区域,提前规划野外调查路线尤为重要。应用遥感技术获取这些区域的地形线性特征,可以为调查人员有选择性的规划和设计野外调查路线提供重要参考。此外,地形线性特征可为区域构造运动信息的认知提供先验知识。

对于地形线性特征提取,目前主要有基于光学影像、基于雷达影像以及基于DEM的3类方法。基于光学影像的方法主要是遥感地质解译,刘新星等(2015)综合多源遥感数据的优势,从30 m、15 m和0.5 m共3个层次的空间分辨率上解译研究区的构造,提高了地质构造解译的准确率。张焜等(2016)在帕米尔高原地区应用高分一号卫星数据进行遥感地质解译,识别了断裂和岩脉等构造。合成孔径雷达对植被和干燥地物具有一定的穿透能力,其侧视成像方式能够增强地形信息,相比于光学遥感,合成孔径雷达在地质学中有更深入的应用(谭衢霖等,2002)。Wu and Lee(2007)利用ERS-2 SAR影像,采用似然比边缘检测算法提取了地质线性构造。Lee and Moon(2002)采用JERS-1雷达影像、TM影像和数字高程模型(digital elevation model, DEM),利用霍夫变换提取了韩国庆尚盆地的线性特征。DEM数据和相关分析技术作为一种常规的地形地

貌研究手段和工具,在典型地貌特征分析中得到了广泛应用(张会平等,2006;李文凯等,2020)。Giles(1998)利用DEM数据实现了地貌实体边界提取和坡度自动分类。Oguchi *et al.*(2003)通过模拟不同的太阳光照角度,得到了日本本州岛中部山区的DEM阴影图像,经过分析山体阴影起伏和目视解译,提取出了野外地质调查中未定义的地形线性特征。晏实江等(2011)基于规则格网DEM,通过引入边缘检测算子自动提取了黄土沟壑区的沟沿线,并分析了不同边缘检测算子提取沟沿线的适宜性。胡金龙等(2020)提出了一种基于DEM的点、线、面一体化山地特征要素提取方法,提取了四川凉山山原地貌区的山顶点、山脊线和山峰控制范围。

由于光学遥感属于被动遥感,在多云和阴雨天气易受影响,且难以在夜间对地观测,应用范围受限(郑鸿瑞等,2018)。同时高植被覆盖区植被茂盛,基岩出露少,光学遥感数据只能提供地表物理信息,无法获取植被覆盖下的地质构造信息。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)属于主动遥感,能主动发射电磁波,对云雨雪有穿透作用,具有全天时和全天候的对地观测能力,有较好的植被穿透性,能够获得植被覆盖下的土壤和地形特征信息,在高植被覆盖区有很强的探测能力,可进行地质地貌等调查(胡官兵等,2019;李强和张景发,2019),因此可用于南岭高植被覆盖区的地形线性特征提取。但是由于合成孔径雷达对地表几何形态和地表粗糙度比较敏感(郑鸿瑞等,2018),在利用SAR影像提取大范围地质区域的线性构造时,会得到很多非目标地物的线性特征,如何去除这些噪声是目前需要解决的问题。此外,大范围高精度DEM数据不易获取,当前仅利用DEM高程信息提取的地形线性特征,无论在提取精度还是边缘定位准确度方面都还有待提高。所以,基于光学影像、基于雷

达影像和基于 DEM 提取地形线性特征的 3 类方法都有其局限性。

综上所述,本文拟采用距离向分辨率 5 m,方位向分辨率 20 m 的 Sentinel-1 雷达影像(重采样为 10 m 分辨率)和分辨率 30 m 的 ASTER GDEM 数据,研究南岭高植被覆盖区的地形线性特征提取方法,即先应用似然比边缘检测算子处理 SAR 影像得到边缘强度图像,利用非极大值抑制算法对边缘强度图像进行细化并选取合适的分割阈值提取出线性特征。再对 DEM 数据进行线性特征增强后采用 Canny 算法检测其主要的线性特征。由于 Sentinel-1 SAR 影像的分辨率比 DEM 数据高,能从微观上提取线性地表构造信息,30 m DEM 数据则可从宏观上提取地形线性特征,因此该方法综合考虑了 SAR 影像提取的微观细节信息和 DEM 数据提取的宏观趋势信息。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

南岭构造带位于华南地区中南部,主体部分处于湖南、江西、广西和广东交界处,经纬度范围 $111^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$, $23^{\circ}20'\sim 26^{\circ}40'\text{N}$,呈东西向展布,盆地和山脉主体沿纬向排列(舒良树等,2006)。该构造带处于滨太平洋构造域与特提斯构造域的交汇部位,横跨华夏板块与扬子板块,经历了多期构造—岩浆活动,形成众多隆、陷地块。南岭构造带发育在华南前震旦纪—早古生代褶皱变质的基底上,出露了华南规模最大的早中生代花岗岩带,是南岭构造带的重要标志(舒良树等,2006;陈国雄等,2014;甘成势等,2016)。本文在南岭地区选取一块典型研究区,范围为 $113^{\circ}15'\sim 113^{\circ}30'\text{E}$, $26^{\circ}10'\sim 26^{\circ}20'\text{N}$,以验证本文方法的可行性。

1.2 数据选择与预处理

Sentinel-1 卫星是欧洲航天局哥白尼计划(GMES)中的地球观测卫星,由 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 两颗卫星组成观测星座,双星运行后最短重访周期为 6 d,可昼夜连续提供图像。Sentinel-1 卫星搭载了 C 波段合成孔径雷达,C 波段的中心波长约为 5 cm,可以穿透植被冠层,获得植被覆盖下的地形信息。根据本文研究对象,选择 Sentinel-1 宽幅干涉成像模式(interferometric wide swath, IW)的 SAR 强度影像作为数据源,成像时间为 2019 年 12 月 27 日,极化方式为 VV 极化,影像的距离向分辨

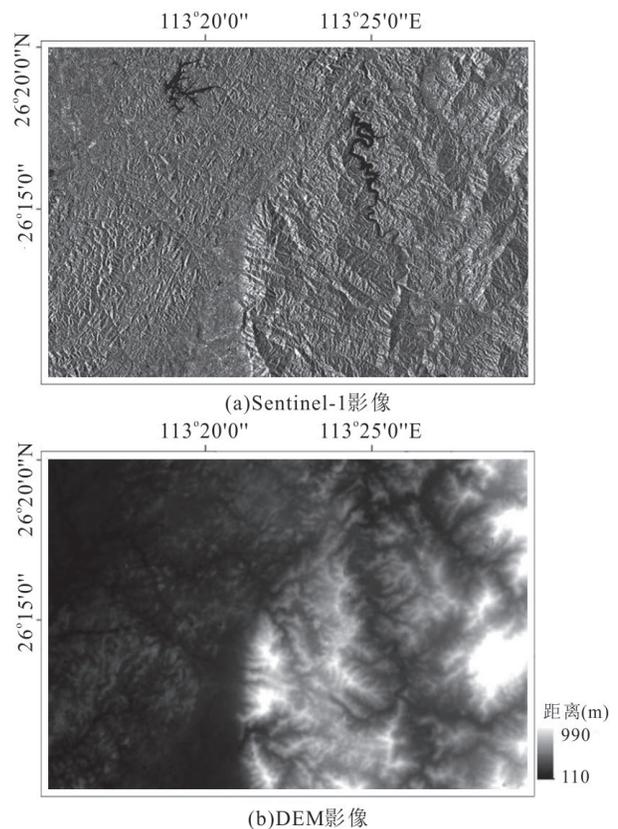


图1 研究区影像

Fig.1 Images in study area

率为 5 m,方位向分辨率为 20 m。DEM 数据则选用了 ASTER GDEM 数据产品,该产品基于先进星载热发射和反辐射计(ASTER)数据计算生成,分辨率为 30 m。该 DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。图 1 为研究区影像。

SAR 影像的预处理包括影像裁剪、几何校正、地理编码、Lee 滤波和辐射定标。预处理后的 SAR 影像距离向分辨率和方位向分辨率均被重采样至 10 m。SAR 合成孔径雷达是侧视相干成像系统,这种成像方式会产生严重的几何畸变,在 SAR 影像上表现为透视收缩、叠掩和山体阴影,需要对影像进行几何校正和地理编码,消除几何畸变。SAR 的相干成像方式也会导致相干斑现象,相干斑的存在使 SAR 影像表现出很强的颗粒噪声,对 SAR 影像进行分析前,需要抑制 SAR 影像中的相干斑噪声。Lee 滤波算法是常用的相干斑抑制算法(涂宽等,2019),对 SAR 影像进行 Lee 滤波,降低相干斑噪声,处理效果较好。

2 研究方法

2.1 基于 Sentinel-1 影像的地形线性特征提取方法

针对光学影像的经典边缘检测算法通常基于这一假设:即影像受到加性噪声的污染.但 SAR 影像的成像机理与光学影像不同,其噪声是乘性的,基于加性噪声模型提出的边缘检测算法不适用于 SAR 影像,若直接应用会出现虚假边缘、遗漏真实边缘的情况(赵凌君等,2007;刘夯等,2017).因此,需要采用基于乘性噪声模型边缘检测算法.似然比边缘检测算法是针对 SAR 影像受乘性噪声影响而提出的优良算法,得到了广泛应用(Wu and Lee, 2007),因此本文拟采用这一算法来提取研究区内的地形线性特征.

似然比算法属于假设检验类算法,在一个固定的窗口内采用了 2 种不同的假设:第 1 种假设窗口内的像元都属于一个同质区,第 2 种假设窗口内的像元分别属于由边缘分隔开的两个不同区域,最后将 2 种假设的似然比作两窗口的交界处是否存在边缘的判决函数.假设 SAR 强度数据服从 Gamma 分布,该算法的广义似然比表达式(Touzi *et al.*, 1988; Germain and Refregier, 2000)如下:

$$\hat{\lambda} = -k \ln(\hat{I}_1) - (M - k) \ln(\hat{I}_2) + M \ln(\hat{I}_0), \quad (1)$$

式中: k 是滑动窗口区域 N_1 的像元数(图 2a), M 是滑动窗口像元总数, \hat{I}_1 是区域 N_1 的均值, \hat{I}_2 是区域 N_2 的均值, \hat{I}_0 是滑动窗口的均值. $\hat{\lambda}$ 表示滑动窗口中心的目标像元被判定为边缘点的可能性, $\hat{\lambda}$ 的值越大,则目标像元归属于边缘点的可能性越大.

图 2a 的窗口设置方式检测的是垂直方向的边缘,但影像中的边缘是多方向的,单一方向的窗口不能满足要求,因此本文采用多方向的滑动窗口(图 2),检测 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四个方向(图 3)的边缘.滑动窗口遍历整幅影像后得到边缘强度映射(edge strength map, ESM), ESM 表示边缘存在的可能性,其值越大,对应点是边缘点的可能性越大.采用分方向的窗口分别遍历影像,并按式(2)进行最大值合成,得到影像的 ESM.

$$ESM = \max(ESM_a, ESM_b, ESM_c, ESM_d). \quad (2)$$

利用非极大值抑制(non maximum suppression, NMS)算法(Neubeck and Van Gool, 2006)处理 ESM,以达到边缘细化和虚假边缘点去除的效果.本文的非极大值抑制是沿着检测方向(图 3)进行

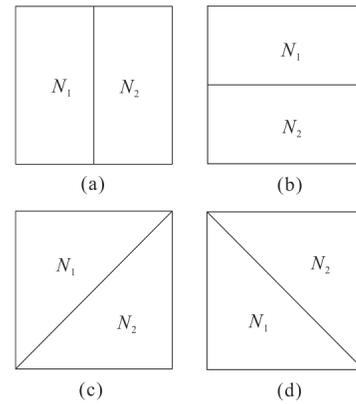


图 2 分方向的滑动窗口(Touzi *et al.*, 1988)

Fig.2 Sliding windows in different directions (Touzi *et al.*, 1988)

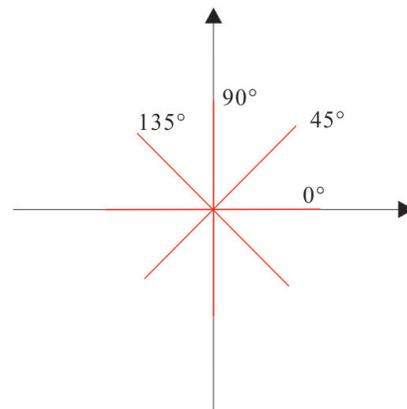


图 3 检测方向

Fig.3 Detection directions

的,如果当前点是检测方向上的局部极大值,则将该点保留,否则将该点舍弃.图 4 给出了 4 个检测方向的 3×3 窗口.最后,根据经验阈值分割提取出研究区的地形线性特征.

2.2 基于 DEM 的地形线性特征提取方法

DEM 与 SAR 影像不同,不受乘性噪声的影响,可采用经典的梯度类边缘检测算法.由于 DEM 的山体阴影可以增强其线性特征(Masoud and Koike, 2011),因此,本文首先对 DEM 数据进行线性特征增强,生成其山体阴影. DEM 阴影处理是模拟太阳光照条件,引起地物的明暗对比来表达地形的立体形态.在生成山体阴影时,太阳高度角和太阳方位角是主要考虑的因子,太阳方位角一般以目标物的正北方向为起始方向 0° .本文以太阳高度角 45° ,太阳方位角 270° (Masoud and Koike, 2011)生成山体阴影数据(图 5).对线性特征增强后的 DEM 数据,分别采用 Canny 算子、Roberts 算子、Sobel 算子和

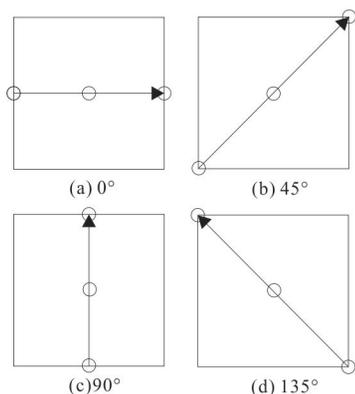


图 4 非极大值抑制窗口 (Neubeck and Van Gool, 2006)
 Fig.4 Windows for non maximum suppression (Neubeck and Van Gool, 2006)

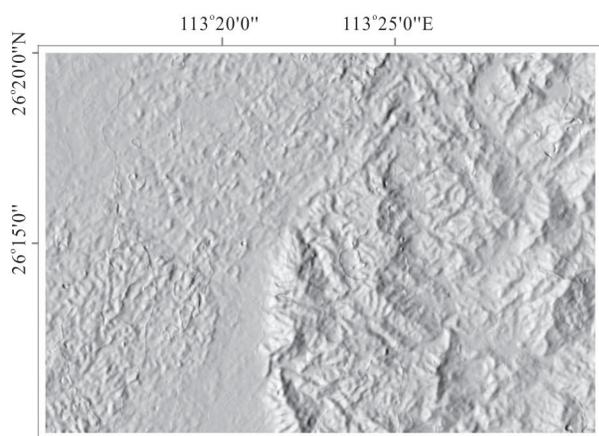


图 5 DEM 山体阴影
 Fig. 5 DEM mountain shading

LoG 算子 4 种检测算法, 自动提取出山脊线和山谷线等地形线性特征.

2.3 基于 Sentinel-1 和 DEM 的地形线性特征提取方法

基于 SAR 影像提取的边缘包含了地形线性特征和弱边缘, 同时易受到伪边缘和噪声的影响. 基于 DEM 数据可提取主要的地形线性特征, 弱纹理和斑点噪声的影响小, 抗噪性强. 同时 SAR 影像的分辨率比 DEM 影像高, 结合 SAR 影像提取的微观信息和 DEM 影像提取的宏观信息, 在保留研究区主要线性特征的同时剔除伪边缘和噪声. 以 DEM 提取出的线性特征建立缓冲区, 与 SAR 影像的提取结果做相交处理提取出主要的地形线性特征, 利用道格拉斯-普克算法 (Douglas-Peucker algorithm) (Douglas and Peucker, 1973) 把相交处理后得到的线性特征进行局部直线拟合, 即得到最终的地形线

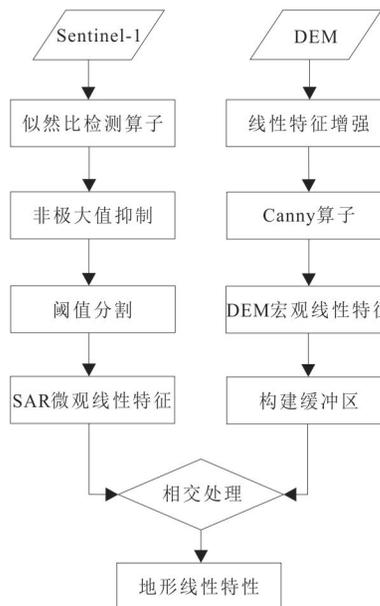


图 6 基于 Sentinel-1 和 DEM 的地形线性特征提取流程
 Fig.6 Flowchart of topographical linear feature extraction based on Sentinel-1 and DEM

性特征. 本文的方法流程图见图 6.

3 结果分析

3.1 基于 Sentinel-1 影像的地形线性特征提取结果分析

根据 3.1 节方法所述, 利用 SAR 影像提取研究区内的地形线性特征, 提取结果如图 7 所示. 合成孔径雷达的侧视成像方式和对地表植被的穿透性使得 SAR 影像中山脊两侧灰度差异大, 地形线性特征明显 (图 1a). 应用似然比检测算子对 SAR 影像进行处理, 得到边缘强度图像 (ESM), 再通过非极大值抑制算法对边缘强度图像进行细化, 并设置经验分割阈值, 可提取出研究区内主要的山脊线和山谷线等典型地形线性特征 (图 7). 由于合成孔径雷达对地表粗糙度变化很敏感以及 SAR 影像阴影和弱纹理的影响, 使得提取结果中存在伪地形线性特征和噪声. 因此, 仅利用 SAR 影像提取地形线性特征, 在得到研究区内主要地形线性特征外, 还提取出了很多伪线性特征和斑点噪声.

3.2 基于 DEM 的地形线性特征提取结果分析

基于 DEM 的地形线性特征提取结果如图 8 所示. 从图 8b 和图 8d 中可以看出, Roberts 算子和 Sobel 算子对 DEM 的线性特征提取效果最差, 仅能提取出少量线性特征. 图 8a 中 LoG 算子提取的线性特

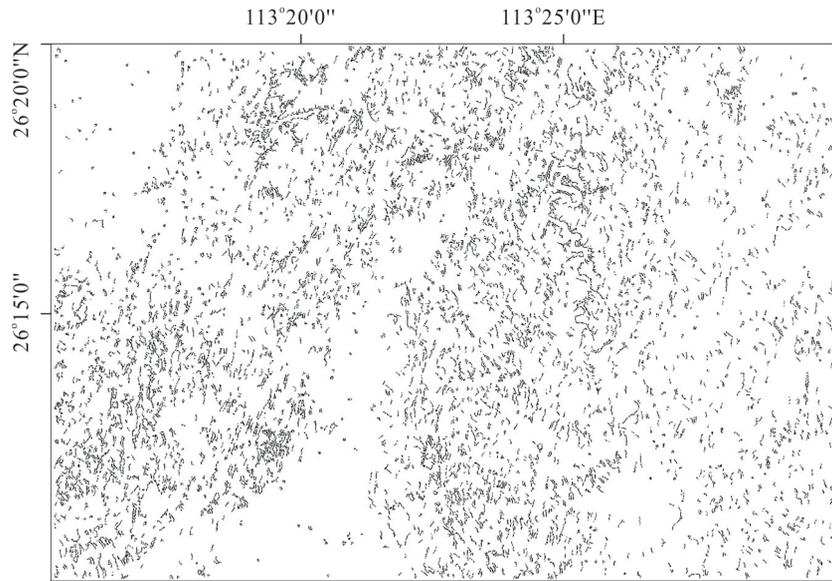


图7 SAR影像地形线性特征提取结果

Fig.7 The topographical linear feature extraction result from SAR images

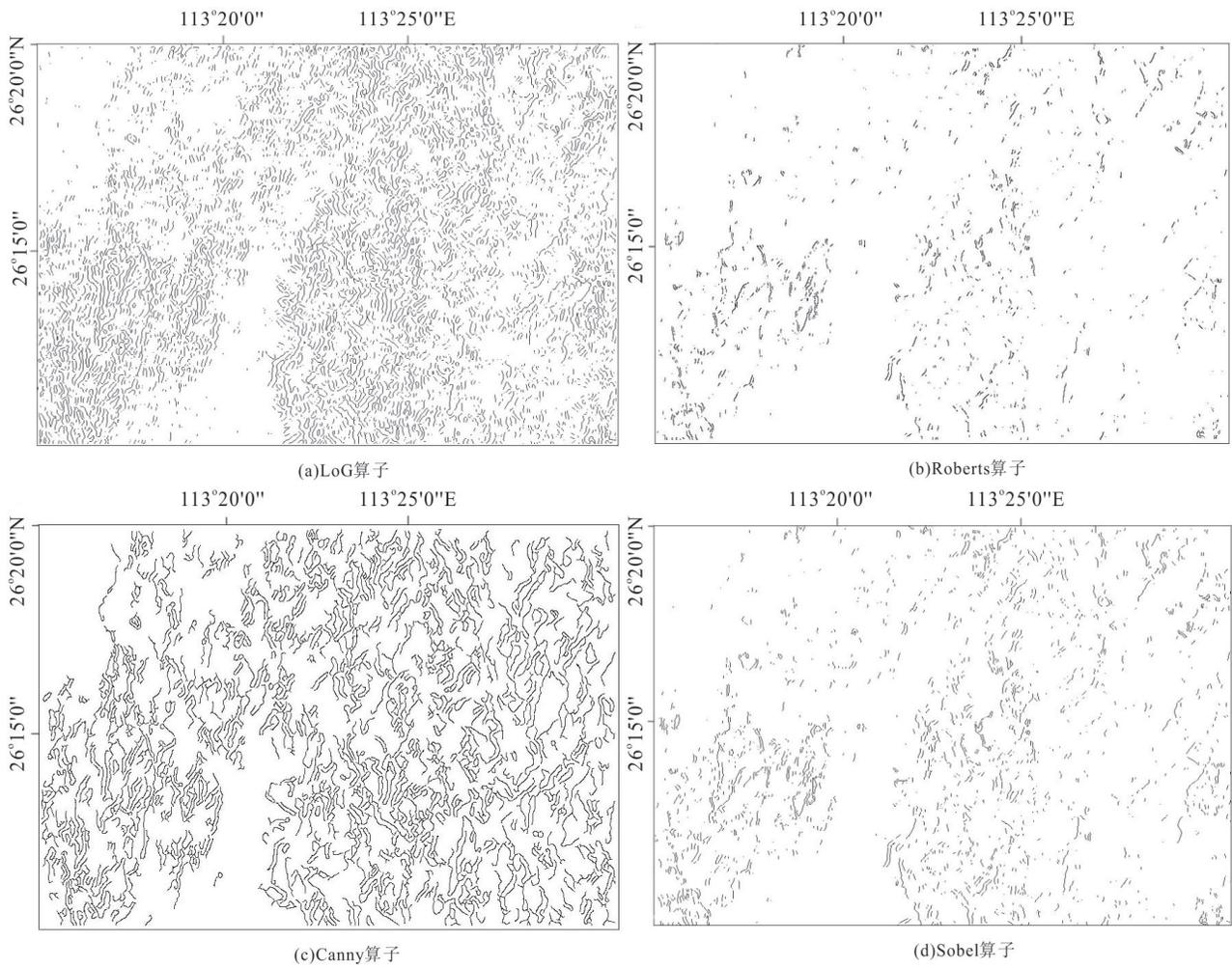


图8 DEM地形线性特征提取结果

Fig.8 The topographical linear feature result from DEM

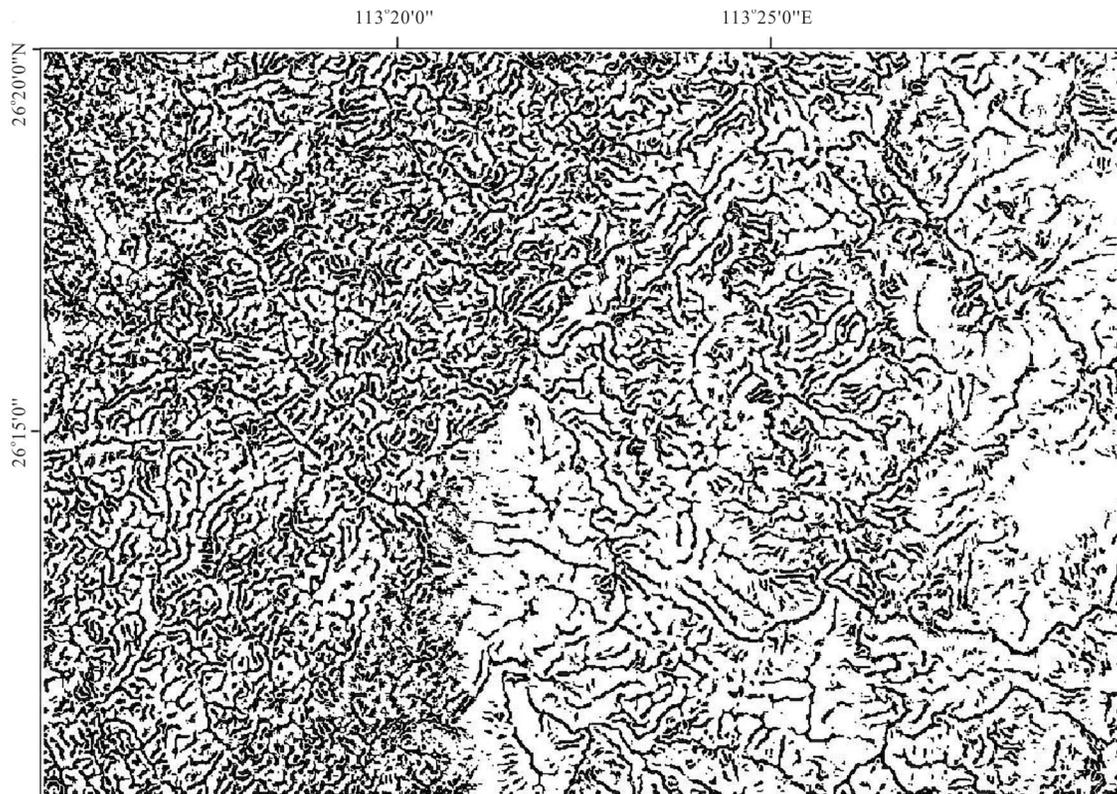


图9 基于DEM水文分析法提取的地形线性特征

Fig.9 The topographical linear feature extracted based on DEM hydrological analysis

征碎片化,存在伪边缘和斑点噪声,图 8c 中 Canny 算子提取的线性特征连续性强,能较为完整地提取出研究区内的山脊线和山谷线等地形线性特征.同时,为了对比 Canny 算子提取 DEM 地形线性特征方法的有效性,将 Canny 算子提取山脊线和山谷线的结果与 DEM 水文分析方法(汤国安和杨昕,2012)提取山脊线和山谷线的结果进行对比分析.

基于 DEM 水文分析方法提取研究区内的山脊线与山谷线,通过 ArcGIS 10.6 中的水文分析功能模块来实现,提取结果如图 9 所示.结合研究区影像(图 1)分析,在研究区内地形较为平坦的区域,DEM 水文分析法提取出了大量碎片化的山脊线与山谷线,与该区域实际的地形不相吻合.同时该方法的提取结果噪声点过多,地形线性特征过于碎片化.而 Canny 算子的提取结果线性特征较为完整,受斑点噪声的影响较小,在地形平坦区域基本没有提取出山脊线和山谷线.因此,本文选用 Canny 检测算子提取 DEM 中的地形线性特征.

3.3 基于 Sentinel-1 和 DEM 的地形线性特征提取结果分析

本文提出了一种基于 Sentinel-1 和 DEM 的地

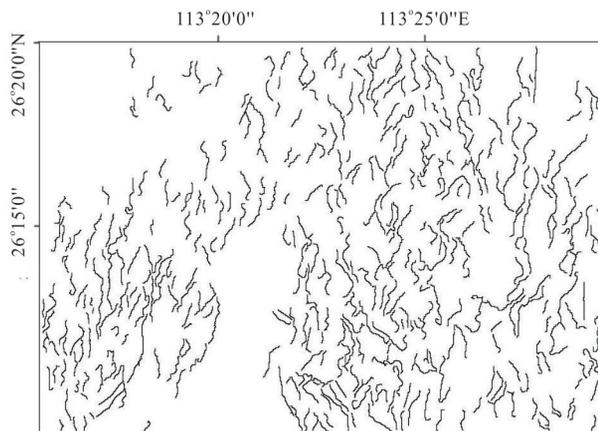


图10 基于 Sentinel-1 和 DEM 提取的地形线性特征

Fig. 10 The topographical linear feature extracted based on Sentinel-1 and DEM

形线性特征提取方法,根据其方法流程(图 6),提取研究区内的地形线性特征.该方法的地形线性特征提取结果(图 10)同时顾及了从 SAR 影像提取的微观线性特征和从 DEM 数据中提取的宏观趋势信息,提取出了研究区内山脊线和山谷线等主要的地形线性特征.将本文方法分别与基于 Sentinel-1 影像的地形线性特征提取方法(即 3.1 节所述方法)和

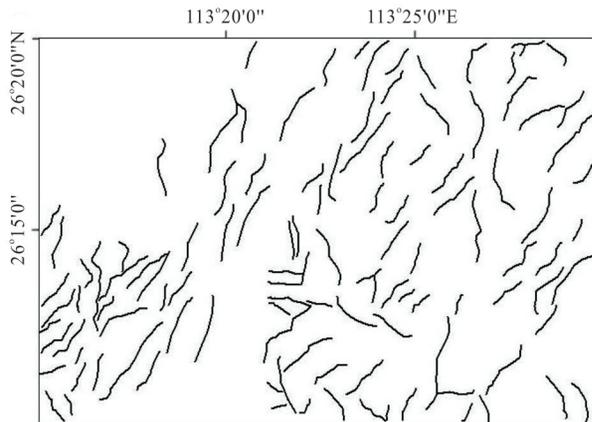


图 11 基于 Google Earth 影像目视解译的地形线性特征
Fig.11 The topographical linear feature based on visual interpretation of Google Earth images

DEM 水文分析法进行对比,分析不同方法的提取结果.基于 Sentinel-1 影像的地形线性特征提取方法仅采用了 SAR 影像,提取出主要的山脊线和山谷线等地形线性特征,而无法去除伪边缘和斑点噪声的影响.本文 3.2 节对 DEM 水文分析法的提取结果进行了分析,该方法有其局限性和不足(胡启明, 2017),提取出的地形线性特征碎片化,斑点噪声多,在研究区内地形平坦区域误提取了山脊线和山谷线.而本文方法不仅提取出了主要地形线性特征,而且有效剔除了伪边缘和斑点噪声,抗噪性较强,相比以上 2 种方法提取效果较好.

此外,本文参照 Google Earth 高分辨率遥感影像目视解译出了研究区内的山脊线和山谷线等地形线性特征(图 11),以图 11 作为研究区地形线性特征真值图,定性分析本文方法提取结果.本文方法提取的地形线性特征与真值图在宏观趋势上基本一致,基本包含了研究区内主要的山脊线与山谷线等地形线性特征.本文方法在像素级尺度提取地形线性特征,因此提取结果中包含了真值图中未解译出的更精细的线性特征.经过对比分析可以说明本文方法的可靠性.

4 结论

(1)由于 Sentinel-1 雷达影像的分辨率比 DEM 数据高, Sentinel-1 影像提取的线性地质构造包含更多的微观线性特征信息,但存在弱纹理引起的伪边缘和噪声.

(2)DEM 因其分辨率较低,可以用来提取宏观的地形线性特征.应用 Canny 边缘检测算法从 DEM

数据中提取的地形线性特征受到伪边缘和噪声的影响小,提取效果较好.

(3)由于合成孔径雷达的穿透性,该方法可以有效应用于植被高覆盖区的地形线性特征提取.

(4)综合 Sentinel-1 影像提取的微观细节信息和 DEM 数据提取的宏观趋势信息,可以消除伪边缘和噪声,同时可保留主要地形线性特征的微观信息.

References

- Chen, G.X., Liu, T.Y., Sun, J.S., et al., 2014. Characteristics of Multi-Scale Gravity Field and Deep Structures in Nanling Metallogenic Belt. *Earth Science*, 39(2): 240–250(in Chinese with English abstract).
- Douglas, D.H., Peucker, T.K., 1973. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature. In: Dodge, M., ed., *Classics in Cartography: Reflections on Influential Articles from Cartographica*. John Wiley & Sons, Ltd., New York.
- Gan, C.S., Wang, Y.J., Cai, Y.F., et al., 2016. The Petrogenesis and Tectonic Implication of Wengong Intrusion in the Nanling Range. *Earth Science*, 41(1): 17–34(in Chinese with English abstract).
- Germain, O., Refregier, P., 2000. On the Bias of the Likelihood Ratio Edge Detector for SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3): 1455–1457. <https://doi.org/10.1109/36.843041>
- Giles, P. T., 1998. Geomorphologic Signatures: Classification of Aggregated Slope Unit Objects from Digital Elevation and Remote Sensing Data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(7): 581–594. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9837\(199807\)23:7<581::aid-esp863>3.0.co;2-s](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9837(199807)23:7<581::aid-esp863>3.0.co;2-s)
- Hu, G.B., Liu, F., Dang, W., et al., 2019. Application of Remote Sensing Technology to Geological Mapping in the Vegetation Covered Area of Southwest Yunnan. *Remote Sensing for Land & Resources*, 31(2): 224–230(in Chinese with English abstract).
- Hu, J.L., Tang, M.G., Luo, M.L., et al., 2020. The Extraction of Characteristic Elements of Mountain Based on DEM. *Journal of Geo-Information Science*, 22(3): 422–430 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Q.M., 2017. Research Progress on Extraction Method of Terrain Features Lines. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 40(4): 47–50, 54(in Chinese with English abstract).

- Lee, T.H., Moon, W.M., 2002. Lineament Extraction from Landsat TM, JERS-1 SAR, and DEM for Geological Applications. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, Ontario, Canada, 3276—3278. <https://doi.org/10.1109/igarss.2002.1027154>
- Li, Q., Zhang, J.F., 2019. Investigation on Earthquake-Induced Landslide in Jiuzhaigou Using Fully Polarimetric GF-3 SAR Images. *Journal of Remote Sensing*, 23(5): 883—891(in Chinese with English abstract).
- Li, W.K., Zhang, W., Qin, J.H., et al., 2020. “Expansion-Fusion” Extraction of Surface Gully Area Based on DEM and High-Resolution Remote Sensing Images. *Earth Science*, 45(6): 1948—1955(in Chinese with English abstract).
- Liu, H., He, Z.W., Zhao, Y.B., et al., 2017. Improved ROEWA Edge Detector for SAR Images. *Journal of Remote Sensing*, 21(2): 273—279(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).
- Liu, X.X., Chen, J.P., Zeng, M., et al., 2015. Geological Structural Interpretation of Qiangduo Area in Tibet Based on Multi-Source Remote Sensing Data. *Remote Sensing for Land & Resources*, 27(3): 154—160(in Chinese with English abstract).
- Masoud, A.A., Koike, K., 2011. Auto-Detection and Integration of Tectonically Significant Lineaments from SRTM DEM and Remotely-Sensed Geophysical Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6): 818—832. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.08.003>
- Neubeck, A., Van Gool, L., 2006. Efficient Non-Maximum Suppression. 18th International Conference on Pattern Recognition(ICPR'06), Hong Kong, 850—855.<https://doi.org/10.1109/icpr.2006.479>
- Oguchi, T., Aoki, T., Matsuta, N., 2003. Identification of an Active Fault in the Japanese Alps from DEM-Based Hill Shading. *Computers & Geosciences*, 29(7): 885—891.[https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00083-9)
- Shu, L.S., Zhou, X.M., Deng, P., et al., 2006. Principal Geological Features of Nanling Tectonic Belt, South China. *Geological Review*, 52(2): 251—265(in Chinese with English abstract).
- Tan, Q.L., Shao, Y., Fan, X.T., 2002. Geology Application of Radar Remote Sensing Technology and Its Development. *Remote Sensing Technology and Application*, 17(5): 269—275(in Chinese with English abstract).
- Tang, G.A., Yang, X., 2012. ArcGIS Geographic Information System Spatial Analysis Experiment Tutorial. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Touzi, R., Lopes, A., Bousquet, P., 1988. A Statistical and Geometrical Edge Detector for SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(6): 764—773. <https://doi.org/10.1109/36.7708>
- Tu, K., Wen, Q., Chen, H., et al., 2019. New Method of Structural Interpretation in Meadow Covering Based on GaoFen-3 Pol-SAR Images. *Journal of Remote Sensing*, 23(2): 243—251 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R.S., Xiong, S.Q., Nie, H.F., et al., 2011. Remote Sensing Technology and Its Application in Geological Exploration. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1699—1743(in Chinese with English abstract).
- Wu, T.D., Lee, M.T., 2007. Geological Lineament and Shoreline Detection in SAR Images. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, 520—523. <https://doi.org/10.1109/igarss.2007.4422845>
- Yan, S.J., Tang, G.A., Li, F.Y., et al., 2011. An Edge Detection Based Method for Extraction of Loess Shoulder-Line from Grid DEM. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 36(3): 363—367(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.P., Yang, N., Liu, S.F., et al., 2006. Recent Progress in the DEM-Based Tectonogeomorphic Study. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 660—669(in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., Ma, S.B., Li, Z.R., et al., 2016. Geological Interpretation of GF-1 Satellite Imagery. *Remote Sensing Information*, 31(1): 115—123(in Chinese with English abstract).
- Zhao, L.J., Jia, C.L., Kuang, G.Y., 2007. Overview of Edge Detection in SAR Images. *Journal of Image and Graphics*, 12(12): 2042—2049(in Chinese with English abstract).
- Zheng, H.R., Xu, Z.G., Gan, L., et al., 2018. Synthetic Aperture Radar Remote Sensing Technology in Geological Application: A Review. *Remote Sensing for Land & Resources*, 30(2): 12—20 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈国雄, 刘天佑, 孙劲松, 等, 2014. 南岭成矿带多尺度重力场及深部构造特征. *地球科学*, 39(2): 240—250.
- 甘成势, 王岳军, 蔡永丰, 等, 2016. 南岭地区温公岩体的岩

- 石成因及其构造指示. 地球科学, 41(1): 17—34.
- 胡官兵, 刘舫, 党伟, 等, 2019. 遥感技术在滇西南植被覆盖区地质填图中的应用. 国土资源遥感, 31(2): 224—230.
- 胡金龙, 唐梦鸽, 罗明良, 等, 2020. 基于DEM的一体化山地特征要素提取. 地球信息科学学报, 22(3): 422—430.
- 胡启明, 2017. 地形特征线提取方法的研究进展. 测绘与空间地理信息, 40(4): 47—50, 54.
- 李强, 张景发, 2019. 高分三号卫星全极化SAR影像九寨沟地震滑坡普查. 遥感学报, 23(5): 883—891.
- 李文凯, 张唯, 秦家豪, 等, 2020. 基于DEM和高分辨率遥感影像的“膨胀—融合”式地表沟壑提取. 地球科学, 45(6): 1948—1955.
- 刘夯, 何政伟, 赵银兵, 等, 2017. SAR图像ROEWA边缘检测器的改进. 遥感学报, 21(2): 273—279.
- 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.
- 刘新星, 陈建平, 曾敏, 等, 2015. 基于多源遥感数据的西藏羌多地区地质构造解译. 国土资源遥感, 27(3): 154—160.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 等, 2006. 南岭构造带的基本地质特征. 地质论评, 52(2): 251—265.
- 谭衢霖, 邵芸, 范湘涛, 2002. 雷达遥感的地质学应用及其进展. 遥感技术与应用, 17(5): 269—275.
- 汤国安, 杨昕, 2012. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社.
- 涂宽, 文强, 谌华, 等, 2019. GF-3全极化影像在地表浅覆盖区进行地质构造解译的新方法. 遥感学报, 23(2): 243—251.
- 王润生, 熊盛青, 聂洪峰, 等, 2011. 遥感地质勘查技术与应用研究. 地质学报, 85(11): 1699—1743.
- 晏实江, 汤国安, 李发源, 等, 2011. 利用DEM边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取. 武汉大学学报·信息科学版, 36(3): 363—367.
- 张会平, 杨农, 刘少峰, 等, 2006. 数字高程模型(DEM)在构造地貌研究中的应用新进展. 地质通报, 25(6): 660—669.
- 张焜, 马世斌, 李宗仁, 等, 2016. 高分一号卫星数据遥感地质解译. 遥感信息, 31(1): 115—123.
- 赵凌君, 贾承丽, 匡纲要, 2007. SAR图像边缘检测方法综述. 中国图象图形学报, 12(12): 2042—2049.
- 郑鸿瑞, 徐志刚, 甘乐, 等, 2018. 合成孔径雷达遥感地质应用综述. 国土资源遥感, 30(2): 12—20.