

引用格式:胡金龙,唐梦鸽,罗明良,等.基于DEM的一体化山地特征要素提取[J].地球信息科学学报,2020,22(3):422-430. [Hu J L, Tang M G, Luo M L, et al. The extraction of characteristic elements of mountain based on DEM[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):422-430. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190558

## 基于DEM的一体化山地特征要素提取

胡金龙,唐梦鸽,罗明良\*,魏 兰,晏自红,秦子晗

西华师范大学国土资源学院,南充 637009

### The Extraction of Characteristic Elements of Mountain based on DEM

HU Jinlong, TANG Mengge, LUO Mingliang\*, WEI Lan, YAN Zihong, QIN Zihan

School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637009, China

**Abstract:** As a vital source of spatial data, DEM plays an important role in the process of geomorphologic characteristics analysis. DEM provides us an opportunity to study the earth surface with an even broader perspective aided by digital terrain structure analysis. The terrain surface often can be regarded as a combination of some fundamental elements, which include the peaks, ridge lines and valley, etc. The peaks and ridge lines depict the macro relief of the terrain, which explains why they often can be used to reveal the morphology, pattern, and evolution processes of the landform. Although the platform of ArcGIS enables the peaks and ridges to be extracted efficiently, there are still many obstacles in existence on the issue of landform features extraction. Firstly, the peaks and ridges extracted by the existing methods are independent of each other, ignoring the expression of their relationship. Secondly, the peaks often be picked out since they are the highest point in a given neighborhood, but these peaks are not necessarily mountain tops in the geomorphological sense and in cognition of mankind. The Liangshan Plateau Mountain in Sichuan Province is taken as a case study, since it is a typical mountainous area and is a transitional zone between the Qinghai-Tibet Plateau and the southwest edge of Sichuan Basin. A novel integrated strategy is provided in the paper to extract mountain peaks and ridges that are close to human cognition. The first step of the method is to section the terrain to obtain the highest points in every patches and the border of the patches. Then the ridge lines are extracted and ordered by a coding formula. An important step in the process is to identify the main peaks and the major ridge lines and finalize the integration of the peaks, mountain ridge lines and their territory. For the purpose of verification, the peaks and ridges extracted by the fuzzy logic algorithm are also presented in the paper. For the results, there are 9 main peaks in the region, 53 secondary peaks with an average elevation of 2540 m. And then 230 ridge lines are obtained, of which 9 main mountain ridges with an average length of 60 km. Besides, there are 9 mountains with an average area of 1017 km<sup>2</sup>. Overall, the mountain system in this area shows a nearly north-south trend. When

收稿日期:2019-09-28;修回日期:2020-02-17.

基金项目:国家自然科学基金项目(41871324);四川省科技厅应用基础重点项目(2018JY0464);西华师范大学英才基金项目(17YC115);西华师范大学校级科研创新项目(xcxy2018300)。 [ **Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41871324; The Applied Basic Research Programs of Science and Technology Department of Sichuan, No.2018JY0464; Talent Fund Project of China West Normal University, No.17YC115; National Science and Technology Innovation Project for College Students of China West Normal University, No.xcxy2018300. ]

作者简介:胡金龙(1998—),男,四川德阳人,研究方向为GIS及其空间分析。E-mail: ltpai91@hotmail.com

\*通讯作者:罗明良(1978—),男,河南信阳人,教授,硕导,研究方向为DEM数字地形分析。E-mail: lolean586@163.com

the fuzzy membership of peaks is between 0.98 and 1, the mountain peaks obtained by the two methods roughly coincide with each other, while the corresponding membership of the ridge lines is between 0.37 and 0.57. When compared with the results obtained by other methods such as fuzzy logic method, the advantages of our algorithm are reflected in the better expression of peaks, main ridges and their interrelationships. It is important in helping people understand that where the mountain peak is, and that where the mountain ridge is, and it is from this point that we think our algorithms have achieved a preliminary transition from raster matrix to geographical objects. This study can be applied to assist in the classification of geomorphological types, regional geographic planning, etc.

**Key words:** mountain peaks; ridge lines; spatial relationship; characteristic element; Liangshan plateau mountain; DEM; fuzzy membership; algorithm

**\*Corresponding author:** LUO Mingliang, E-mail: lolean586@163.com

**摘要:**山顶点 and 山脊线等特征地形要素是构成地表地形及其起伏变化的基本框架,对地形在地表的空间分布具有控制作用。基于DEM研究山顶点、山脊线及其空间组合关系,是DEM地表形态特征研究的重要内容,也是衔接从地形特征分析向山峰等地貌学本源语言的途径之一。本文以四川盆地西南缘与青藏高原过渡地带的川西凉山山原为例,基于山峰—山脊线—控制范围一体化构建的算法策略,识别了山峰和山脊线及其等级、主山脊及其范围。结果表明,研究区内有主峰9座,次峰53座,平均高程2540 m;山脊线230条,其中主山脊9条,平均长度60 km;9大山系,近南北走向,平均控制面积1017 km<sup>2</sup>。研究用模糊隶属度方法对算法所提取的主峰、主脉进行精度验证,隶属度介于0.98~1.00和0.37~0.57时提取的主峰、主脉基本吻合算法提取的结果。研究采用一体化山地特征要素提取方法,实现了各山地要素间紧密联系、总体结构与区域地貌特征相对吻合的目标;完成了由栅格单元向地理对象的转变;可以应用于协助地貌类型划分、协同区域地理规划等。

**关键词:**山峰;山脊线;空间关系;特征要素;凉山山原;DEM;模糊隶属度;算法

## 1 引言

山地是影响生物地理分布和自然地理区域界限的重要地形之一<sup>[1-2]</sup>。中国是山地大国,山地面积约占陆地国土总面积的70%,山区人口约占全国人口的45%,深入研究山地地貌区划,可为地区发展规划和山地地质灾害的预防提供相应依据<sup>[3]</sup>。传统的山地地貌区划,多以地表形态或地貌成因为依据,在顾及地学传统认知基础上进行分区<sup>[4]</sup>,一般将山地按照其海拔高度分为高山、中山以及低山等。2005年启用的《中国1:100万数字地貌分类与编码体系》<sup>[5]</sup>提出,在地貌分区过程中应遵守“地貌统一”、“山地完整性”等原则。但该方案对区域性原则并未给出具体的量化标准,在实际区划过程中,尤其是在中、低等级地貌区划时区域性原则具有一定的主观性;因顾及“山地完整性”原则,需要以山麓线、沟谷线等来分割地貌实体,有可能将大片中海拔甚至低海拔区域被划分至高海拔山地中<sup>[6]</sup>,这与按照海拔、起伏度等划分山地地貌的一般认知规律不符。地貌区按照空间尺度多分为四到五级,如周廷儒等<sup>[7]</sup>将全国划分为“地形综合体—副区—中区—小区”四级。程维明等<sup>[8]</sup>改进前人提出的地貌区划方案,提出“地貌大区—地貌地区—地貌区—

地貌亚区—地貌小区”的五级地貌分区方案;其中第四级、五级一般对应例如若尔盖高山山原宽谷亚区、阿坝若尔盖高山高原小区等地貌形体;五级以下的山地特征要素提取、分析及其对象隶属关系研究仍有待深入。

回溯钟业勋等<sup>[9]</sup>对山的数学定义,山地应涵盖以下几点特征:具有一定的控制范围;山与山之间存在相互联系;等级大小不同的山峰之间存在隶属关系。如邛崃山系,一般认为其向上追溯属于横断山脉;向下由夹金山、二郎山、四姑娘山等山脉组成;而四姑娘山又由大峰、二峰、三峰及幺峰等4座山峰组成。可见在地貌亚区或小区中可能包含众多山系,山系包含众多山脉,而山脉上分布一系列主峰及次峰。约定同一条山脉中最高的山峰称为主峰,主峰所在山脊称为主脉,其等级最高;主脉的分支称为支脉,支脉不断分支等级逐次降低,直至到达山脉末端。山脊等特征地形要素是构成地表地形和起伏变化的基本框架,对地形在地表的空间分布具有控制作用<sup>[10-11]</sup>,山地特征地形是山地细部的重要构成要素,影响着水文过程、植被分布等众多自然要素,其空间分布特征是用以描述空间变化过程的重要指标<sup>[12]</sup>。随着GIS技术的发展,基于GIS相关软件集成量化指标(如起伏度、坡度等)

工具进行地貌分区得到广泛应用<sup>[4,13-14]</sup>。如何实现从基于DEM的地形分析向山峰、山系等山地特征要素过渡仍需进一步的探索。尽管随着DEM数字地形分析技术的发展,特征要素提取与分析成为研究热点之一,但这些提取方法多为单一特征要素如山顶点<sup>[15-17]</sup>、或特征线(如沟谷线<sup>[18-19]</sup>、沟沿线<sup>[20-21]</sup>、山脊线<sup>[22-23]</sup>等)提取及其分析,提取所得到的特征要素间独立性较强,缺乏紧密联系。

综合地貌学理论认知及前人研究成果,本文提出一种基于DEM的点、线、面一体化山地特征要素提取算法。算法从凉山山原区的DEM中一体化的提取出山顶点、山脊线及山峰控制范围,并将三者依据山系—山脉—山峰的结构进行划分。该算法同时进行山地地貌分区和山地特征(山顶点、山脊线)提取,得到的特征要素之间耦合良好,保证了山地地貌区划的完整性,对山地地貌分区细化、区域性定量标准及特征要素提取进行了有益尝试。

## 2 研究概况、数据来源及研究方法

### 2.1 研究区概况及数据源

本研究以凉山山原地貌区的山地区域为实验样区(图1)。区域地处四川盆地西南缘向青藏高原的过渡地带;北至大渡河,西以牛日河、尼日河、曼



图1 川西凉山山原区DEM

Fig. 1 The DEM of Liangshan plateau mountain in Sichuan province, China

滩河、普雄河为界,东南方向为金沙江河谷,面积约为9248 km<sup>2</sup>。研究所选样区地表起伏大,切割破碎,山高坡陡,在山地研究中具有较高的典型性。研究选用美国航天飞机雷达测绘90 m分辨率的SRTM3 DEM数据为基础数据,辅以行政区划、城市、河流及山峰等数据。

### 2.2 点、线、面一体化提取原理

#### 2.2.1 技术流程

算法融合罗明良等<sup>[24]</sup>和罗寅等<sup>[25]</sup>的研究成果,保证了所提取特征要素间良好的耦合效果,同时弥补了要素间独立性差的缺陷。主要流程如图2所示,分为山顶点及山峰控制范围确定、山脊线提取及隶属关系确定3个部分。其中山顶点及其山峰控制范围采用地形剖分法进行提取<sup>[24]</sup>。

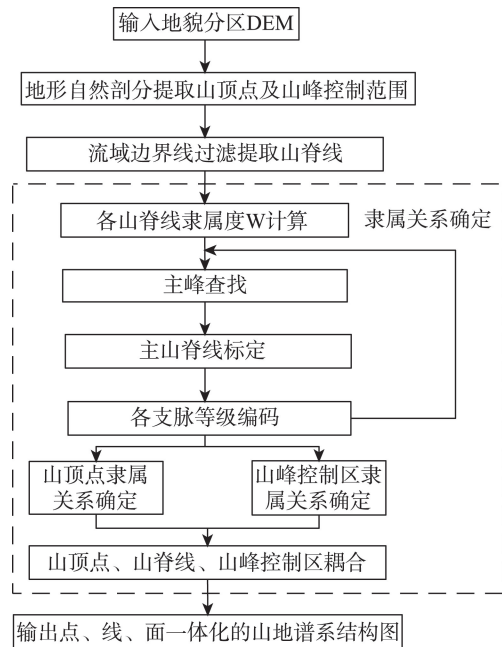


图2 基于DEM的一体化山地特征要素提取流程  
Fig. 2 The process of systematic mountain structure extraction based on DEM

#### 2.2.2 山脊线提取及其等级编码

从水文物理过程而言,山脊和山谷分别代表分水性和汇水性,山脊线一般与区域范围分水线相吻合,可由分水线提取转化获得<sup>[10,26]</sup>;基于DEM获取区域正地形,使用正地形作为掩膜,将封闭的分水线打断,并过滤平坦坡脚区的伪山脊线,即可获得研究所需的山脊线;综合罗寅等<sup>[25]</sup>的山脊线等级编码方法,标定山脊线等级。其大致原理如图3所示,山脉可视作是由众多山脊线段组合形成。通过构



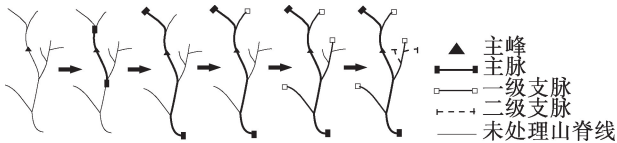


图3 山脉线编码原理(改绘自文献[25])

Fig. 3 The coding principle of ridge line

造隶属度函数  $W$ , 对山脊线段对山脉主体的隶属程度进行定量, 随后综合比较各山脊段, 筛选出其中平均海拔最高的一段作为主山脊起始段, 查找所有与该段邻接的山脊段, 分别将其左、右邻接山脊线段中隶属度  $W$  最高的山脊段标定为山脊。主山脊确定后, 其他分布于山脉两侧而又未被标定为山脊的, 即为低一级山脊线。迭代此过程, 直到所有山脊线标定完成。周成虎等<sup>[27]</sup>认为山地主体具有海拔高、起伏缓等特性, 且地貌形态类型可由海拔高度(AE, Average Elevation)、地面坡度(AS, Average Slope)和起伏高度(AD, Average Deviation)3个指标逐级划分。罗寅等<sup>[25]</sup>给出的隶属度函数如式(1)所示。

$$W = (AE - AD)^{(1 - AS/90)} \quad (1)$$

由式(1)可知, 划分结果主要取决于  $AE$  与  $AD$  的差值, 即山脊海拔越高, 起伏度越小, 隶属于山脉的可能性越高; 同时, 权值大小受坡度影响, 山脊越陡峭,  $W$  值越小, 山脊段隶属于山脉主体的可能性越小。这与山地主体的海拔高、起伏缓等特点的结论相一致<sup>[25]</sup>。

### 2.3 精度验证

有研究表明, 采用模糊隶属度方法提取山峰和山脉可以获得较为合理的结果<sup>[28]</sup>。基于此, 本研究为验证一体化提取算法获取山顶、山脊的合理性, 基于地理对象具有一定模糊性的认识, 设计了基于模糊隶属度的山顶、主山脊识别方案。模糊逻辑算法通过将研究对象的属性值转化为0~1区间的一个隶属函数, 可以定量分析受多因素影响的因子隶属于某种地理对象的可能性程度<sup>[29]</sup>。隶属度现已在分析土壤属性的空间分布特征<sup>[30]</sup>、区域城市化水平进程<sup>[31]</sup>等多个方面受到广泛应用。主峰识别方面, 叠加不同剖分阈值得到的多个山顶点层, 基于模糊隶属度判别主峰。主山脊识别方面, 考虑到主山峰一般位于主山脉上, 一般为山系范围内高程极大值点, 高程值越大越可能为区域主山脊<sup>[32]</sup>。在 ArcGIS 中获取山脊线高程, 采用模糊逻辑算法判别不同高

程的山脊线属于主山脊的可能性。最后通过将模糊隶属度所提取的主峰、主脉与一体化算法所提取的主峰、主脉进行对比, 可以验证本文所提出算法在提取一体化山地特征要素提取的优势。

## 3 结果及分析

样区共得到230个山顶, 基于一体化算法最终得到主峰12座, 次峰53座, 山顶点最高海拔4493 m, 最低1012 m, 区域内山顶点间极差达到3000 m以上, 与此处地形破碎特征现状相符, 山峰海拔高度按等级依次降低(主峰>次峰>普通山峰), 山顶点属性见表1, 各山峰在空间范围内分布效果图4(a)所示。

表1 凉山山原区山顶点高程表

Tab. 1 Elevation information of peaks of Liangshan plateau mountain

	主峰	次峰	全部山峰
数量/座	12	53	230
最高海拔/m	4493	3946	4493
最低海拔/m	2124	1131	1012
平均海拔/m	3475	3152	2540
标准差/m	625	599	707

将区域等高线与所得山顶点进行套合, 观察其与等高线间的位置关系, 可以验证算法所提山峰位置的合理性, 图4(b)为局部套合效果(主峰6)。综合图4(a)可知, 所得山顶点均处于等高线内圈, 且与山脊线吻合良好, 提取效果较为理想。各主峰均基本位于相应山脉高程最大处, 其中1~4号主峰海拔为各条山脉中最大。

基于四川省测绘地理信息局编制的岳西县、美姑县、甘洛县、马边彝族自治县、金河口区、峨边彝族自治县、雷波县四川标准地图(自然地理版)<sup>[33]</sup>可知, 图4(a)所提取的主峰较为合理, 能从资料中查阅到与其对应的主峰名称及相关信息。主峰编号与主峰对应关系见表2; 其中, 编号为10、11及12号主峰因位于研究区边缘, 无法准确判定其主峰名称。

研究样区共得到山系9条(去除3条误提取山系), 山脊线230条, 区域内山脊线多呈羽状或平行状分布(图5)。其中一级支脉53条, 二级支脉60条, 山脊线平均长度约2 km, 平均高程为2424 m, 详细信息见表3所示。由图4(b)可以看出, 山脊线均位于等高线曲率最大处, 因而应用算法提取山脊线效果较好。

研究采用DEM点、线、面一体化山地特征要素



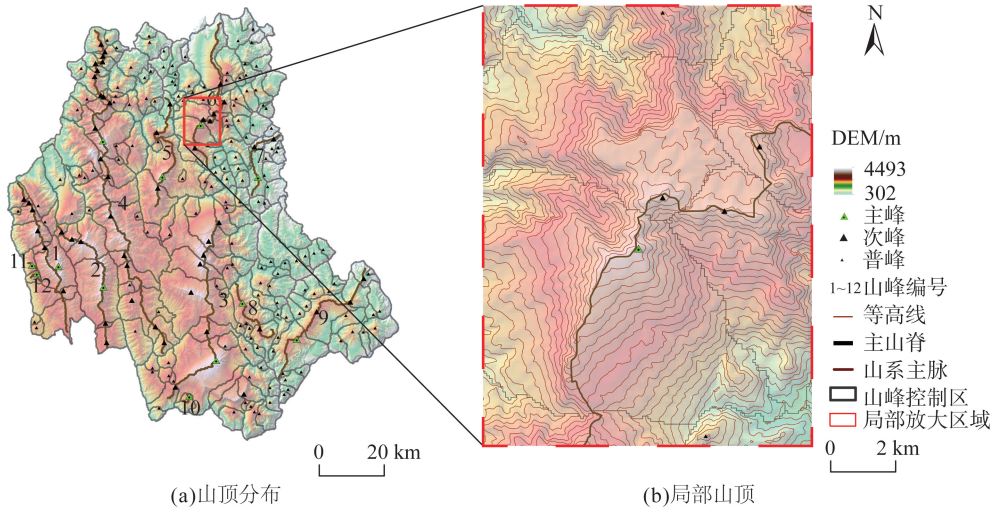


图4 凉山山原区山顶分布及局部山顶

Fig. 4 The peaks distribution of Liangshan plateau mountain and detailed local peaks

表2 凉山山原区主峰命名及其依据

Tab. 2 The names of the main mountain peaks of Liangshan plateau mountain

编号	山峰名称	命名依据
1	库洛莫山	甘洛县地图
2	果峨瓦西	越西县地图距苏洛乡约5.5 km
3	硕诺木尺合	美姑县地图
4	马鞍山	甘洛县地图
5	瓦坚普	距峨边县地图注记11 km
6	挖纪孜德	峨边县地图
7	烟峰山	距马边县地图标注约8 km
8	日郭曲	雷波县地图
9	锦屏山	雷波县地图

注：表中甘洛县等地区地图为四川省标准地图·自然地理版。

提取算法对山峰、山脉、山系进行一体化提取；研究所得山峰分区230个，每座山峰拥有一条独有的山脊线(图6)。在山峰分区基础上，依据山峰所对应的山脊线间具有连通关系的认知，将互不连通的两段山脊线划分到不同山系。基于该思想对山峰区进行划分，得到山系分区(图7)。

区域共获取山脉12条，其中10、11、12这三条山脉位于研究区边界，考虑到边界效应，对此3条山脉

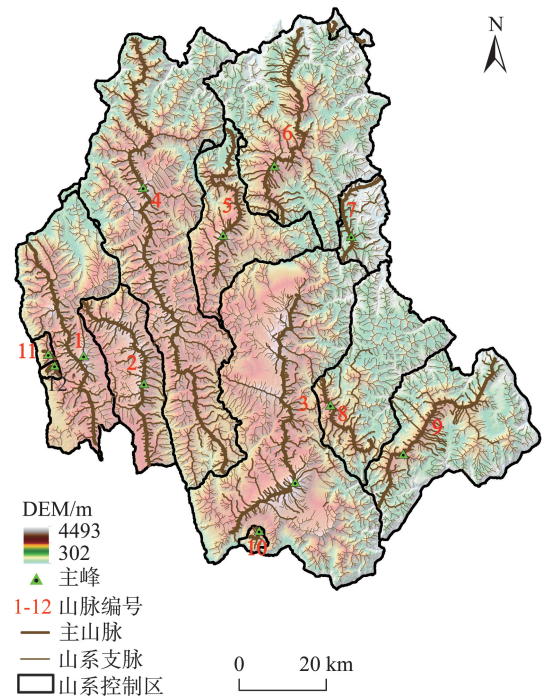


图5 凉山山原区山脊线分布

Fig. 5 The distribution of ridge lines of Liangshan plateau mountain

表3 凉山山原区山脊线属性统计

Tab. 3 The attribution statistic of ridge lines of Liangshan plateau mountain

	数量/条	最长长度/km	最短长度/km	平均长度/km	最低高程/m	最高高程/m	平均高程/m
主脉	9	133.54	27.13	60.73	789	4212	3037
一级支脉	53	27.03	0.06	2.86	761	4113	2755
二级支脉	60	28.09	0.26	1.76	767	4062	2531
全部山脉	230	133.54	0.06	2.01	752	4212	2425

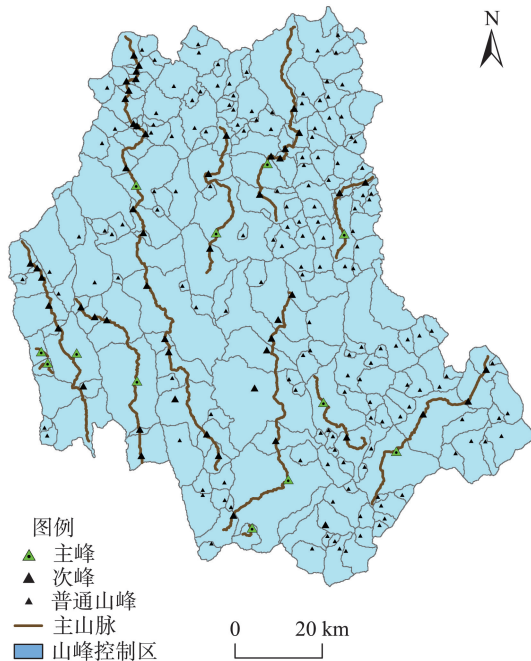


图6 凉山山原区山峰分区  
Fig. 6 Mountain peaks distribution in Liangshan plateau mountain

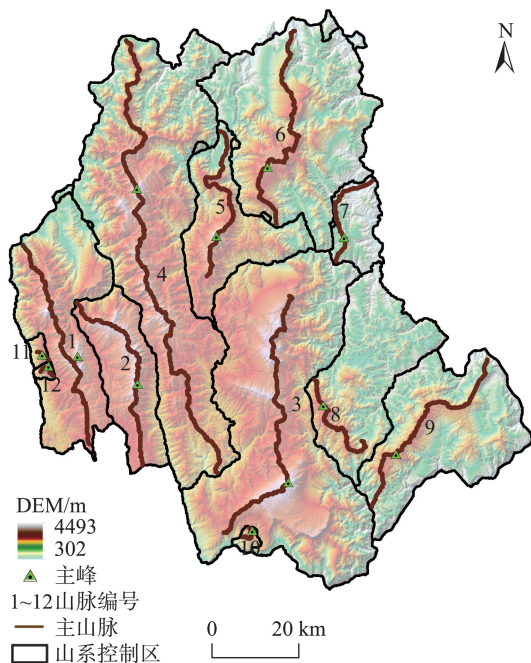


图7 凉山山原区山系分区  
Fig. 7 Mountain ridges distribution in Liangshan plateau mountain

不进行相关名称查验及走向分析。其中山脉1、2、4、8为近西北—东南分布;山脉3大致呈现出西南—东北—北分布形态;山脉5、6近南北分布;山脉7呈现出近南—北—东北方向分布;山脉9为近西南

—东北分布。总体而言,研究区内山脉以南北走向为主。依据研究区内各个县区县志及相关资料(甘洛县、美姑县、马边县),查阅所提取出的各条山脉(编号1—9)名称,查阅结果如表4所示。

表4 凉山山原区主山脉命名及其依据

Tab. 4 The names of main ridge line of Liangshan plateau mountain

编号	山脉名称	命名依据
1	凉山中部大山	甘洛县县志
2	凉山中部大山、阿米特洛	甘洛县、美姑县县志
3	大风顶、黄茅埂、连渣果峨、鸡公山	美姑县、马边县县志
4	特克哄哄山	甘洛县资料
5	瓦侯能和	美姑县资料
6	药子山、大花梗	马边县资料
7	来司岗和大有岗	马边县县志
8	麻捏姑、茶条山	马边县县志
9	麻咪泽	马边县县志

注:甘洛县等地方县志为查阅当地县志获得。

从图7可以看出,该区共被分为12个山系区,除在实验区边界因边际效应产生3个较小的误分山系区外,各区域均以河流沟谷作为山系分界线;各区主山脉线多位于区域中心,且河流多发源于此;主峰多位于山系控制区中央且在主山脉线上;总体结果较为合理。

## 4 讨论

### 4.1 一体化方法提取主峰的精度

按照前文提到的空间剖分方法,改变阈值提取多个山顶点图层;将获得的多个图层叠置,获取山顶点频率;计算各山顶点的模糊隶属度,隶属度与对应山顶点数量关系如图8所示。

区域内山顶点隶属度范围介于0.58~0.99,共包含3845个山顶点。对比各值域范围内(主要为>0.96、>0.97、>0.98)提取的山顶点数量和位置,选取隶属度为0.98~1.00之间的山顶点(23个)作为隶属度方法提取的主峰结果,如图9所示。将2种方法的提取结果进行对比,可以发现,算法所提取的1—10号主峰与隶属度提取结果基本吻合,10—12号主峰则未被隶属度方法提取出来。这可能由于边缘效应引起,10—12号主峰位于研究区边缘,山脉范围不完整,所提山顶点无法确定是否为整条山脉的主峰;且相应位置地形起伏不明显,随着阈值增大,山顶点被过滤掉,被划分为主峰的频率降低。

此外,隶属度方法提取主峰时并未依托于山峰



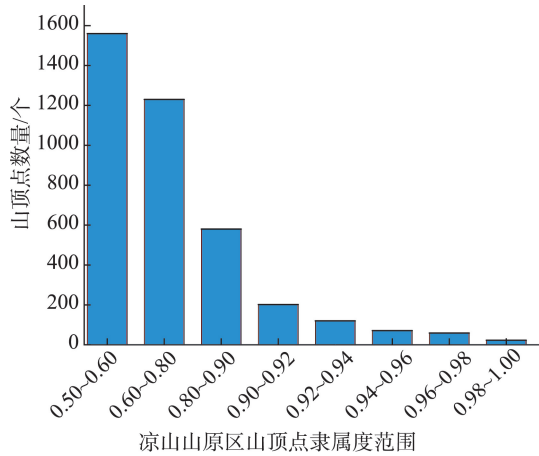


图8 凉山山原区隶属度对山顶点数量的影响  
Fig. 8 the relationship between fuzzy membership and number of peaks in Liangshan

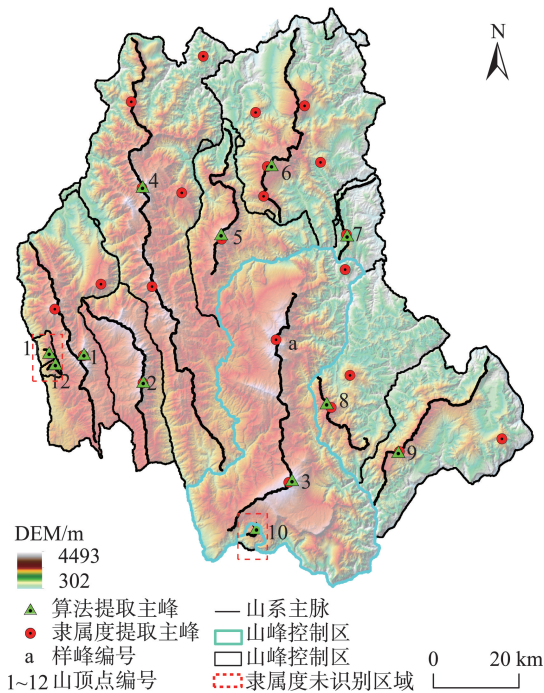


图9 凉山山原区隶属度提取与一体化算法提取主峰对比  
Fig. 9 The comparison between the main peaks extracted by fuzzy membership and algorithm in Liangshan

隶属关系,仅满足区域相对高程最大这一条件,致使同一山系内出现多座主峰,与实际地理认知不符。以图9中的高亮区域为例,该区域为一个完整山脉,但隶属度方法却提取出2座主峰(主峰a和主峰3,隶属度为0.98~1),而一体化方法只保留了其中高程最大的3号主峰。一体化方法在进行次级山峰控制区合并时,考虑到山脉连续性,将山脉范围内多个次级山脉进行合并,合并时保留山脉范围内高程最大的点(隶属度也最大)作为主峰,因此,一

体化方法提取的主峰更加合理。

#### 4.2 一体化算法提取山脊线的合理性

为了定量判定上述算法所提取的山脊线是否为主山脊,研究获取了山脊沿线的高程属性,基于高程计算所有山脊线为主山脉的隶属度,最终得到的隶属度值域范围为0~0.57。结合区域宏观地形起伏特征,选择隶属度介于0.37~0.57作为主山脉阈值,结果如图10所示。从图10可以看出,除山脉7和10外,其余山脉2种方法提取效果基本相似。究其原因,除7号和10号山脉位于研究区边界、边缘效应明显,区域高程相对较低也是导致隶属度方法未将其识别为主山脉的原因。此外,按模糊隶属度方法提取主山脉时,由于区域高程影响较大,无法剔除与主山脉相连、高程接近的次级山脉,致使隶属度方法识别的主山脉存在众多毛刺状的分支。另外,即使是主要山脉,因其存在高低起伏,基于高程的模糊隶属度方法常切断主脉,形成2条山脉,如图10中的山脉3。综上,一体化算法提取主山脉表现出一定优势,更能体现区域山脉的实际走向。

### 5 结论

传统山地地貌认知将山划分为高山、中山和低

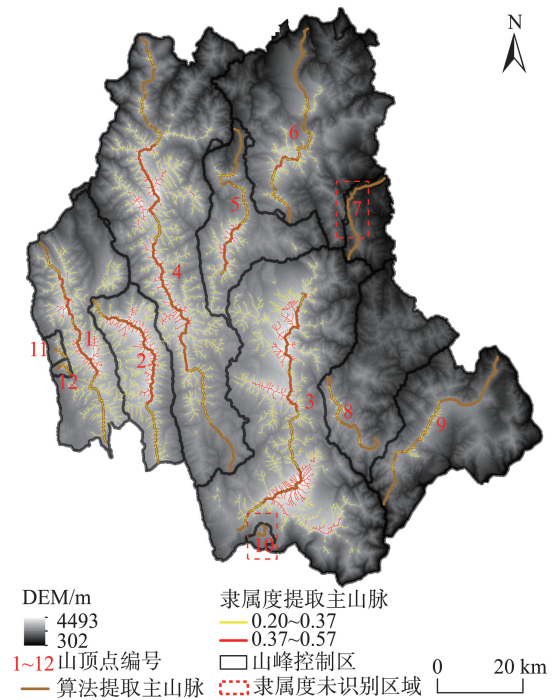


图10 基于隶属度方法提取的凉山山原区主山脉  
Fig. 10 The main ridge lines extracted by fuzzy membership in Liangshan



山等不同类型;后以山体高程作为量化标准,将不同高程范围山地划分至不同亚类;但地理对象的认知因人而异、因地而异,存在较大的模糊性<sup>[34-35]</sup>,不同研究结果之间可能存在差异。本文依据传统地貌学认知,认为山地地貌应具有隶属和包含关系,在此基础上提出一种以DEM为数据源进行山地地貌分区与点、线、面地形特征要素提取的算法;此外,为验证提取算法的有效性,文章采用模糊隶属度方法对算法提取的主峰、主山脉进行校验。主要得出以下几点结论:

(1)研究以凉山山原区为实验样区,采用一体化方法共提取出主峰9座,次峰53座,山脊线230条,其中主山脊9条,9大山系,近南北走向,识别的主峰、主山脉基本可从现有资料中查证,算法所提取的山地地形特征要素合理;研究采用隶属度方法对算法所提结果进行精度验证,在隶属度介于0.98~1和0.37~0.57时,提取的主峰、主脉与算法提取结果基本吻合。实验所得结构与预期隶属规律(地貌区—山系—山脉—山峰)相一致,算法达到预期目的,山地地貌分区符合地貌学认知,且二者之间耦合关系良好。

(2)本文所提出的一体化构建方案跳出地形分析“实验”范畴,实现了基于DEM的特征地形要素分析从实验模型向大众认知<sup>[35]</sup>的过渡;通过一体化提取和分析,这些地理对象既具有地形分析赋予的空间定位和数值特征,例如高程、长度、面积或体积等,实现从栅格向实体的嬗变;又与区域地理标记相衔接,与大众认知的地理对象对应。该方法在理论上,有助于从更宏观的视野来把握不同尺度地理对象相互嵌套和彼此构成的复杂关系;在应用上可以协助地貌类型划分,协同区域地理规划,为相关研究提供参照。

(3)本算法尚存在一些问题,如因边际效应影响,算法在样区边缘得到3个极小的伪山系,本文对于山区特征的探讨均在去除边际效应影响下进行讨论,后续仍需对边际效应的影响及其抑制方法进行进一步研究。此外,研究区山地详细资料少,给山峰和山脉的命名带来困扰,有待于未来进一步完善。

#### 参考文献(References):

- [1] Hammond E H. Analysis of properties in land form geography: an application to broad-scale land form mapping [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1964,54(1):11-19.
- [2] 王襄平,王志恒,方精云,等.中国的主要山脉和山峰[J].生物多样性,2004,12(1):206-212. [Wang X P, Wang Z H, Fang J W. Mountain ranges and peaks in China[J]. *Biodiversity Science*, 2004,12(1):206-212.]
- [3] 宁珂,王石英.基于GIS、RS的四川省地貌区划[J].云南地理环境研究,2018,30(3):47-54. [Ning K, Wang S Y. A study of geomorphological regionalization of Sichuan using GIS and RS[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2018,30(3):47-54.]
- [4] 钟祥浩,刘淑珍.中国山地分类研究[J].山地学报,2014,32(2):129-140. [Zhong X H, Liu S Z. Research on the mountain classification in China[J]. *Mountain Research*, 2014,32(2):129-140.]
- [5] 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室.中国1:100万数字地貌分类与编码体系[S].2005. [National Key Laboratory of resource and environmental information system, Institute of Geographical Sciences and resources, Chinese Academy of Sciences. 1: 1 000 000 digital geomorphological classification and coding system of China[S]. 2005.]
- [6] 岳健,杨发相,穆桂金等.关于中国1:100万数字地貌制图若干问题的讨论[J].干旱区研究,2009,26(4):591-598. [Yue J, Yang F X, Mu G J, et al. Discussion on some issues about the 1: 1 000 000 digital geomorphologic mapping in China[J]. *Arid Zone Research*, 2009,26(4):591-598.]
- [7] 周廷儒,施雅风,陈述彭.中国地形区划草案/中国自然区划草案[M].北京:科学出版社,1956. [Zhou T R, Shi Y F, Chen S P. Topographic compartmentalization draft of China/ Physical compartmentalization draft of China. Beijing: Science Press, 1956.]
- [8] 程维明,周成虎,李炳元,等.中国地貌区划理论与分区体系研究[J].地理学报,2019,74(5):839-856. [Cheng W M, Zhou C H, Li B Y, et al. Geomorphological regionalization theory system and division methodology of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(5):839-856.]
- [9] 钟业勋,魏文展,李占元,等.基本地貌形态学定义的研究[J].测绘科学,2002,27(3):16-18. [Zhong Y X, Wei Y Z, Li Z Y. A research on the mathematical definition of the basic landform shape[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2002,27(3):16-18.]
- [10] 汤国安,李发源,刘学军,等.数字高程模型教程[M].北京:科学出版社,2016. [Tang G A, Li F Y, Liu X J, et al. *Tutorials of Digital Elevation Models*[M]. Beijing: Science Press, 2016.]
- [11] 薛凯凯,熊礼阳,祝士杰等.基于DEM的黄土峁提取及其地形特征分析[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1710-1720. [Xue K K, Xiong L Y, Zhu S J, et al. Extraction of loess dissected saddle and its terrain analysis by using digital elevation models[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(12):1710-1720.]
- [12] 郭伦,刘瑜,张晶,等.地理信息系统—原理、方法和应用[M].北京:北京大学出版社,2001. [Wu L, Liu Y, Zhang J, et al. *Geographic information system-principle, method and application*[M]. Beijing: Peking University Press, 2001.]
- [13] Bocco G, Mendoza M, Velázquez A. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping: A tool

- for land use planning in developing countries[J]. *Geomorphology*, 2001,39(3):211-219.
- [14] 常直杨,孙伟红,王建,等.青藏高原及其邻近地区地貌类型划分[J].*山地学报*,2017,35(1):1-8. [Chang Z Y, Sun W H, Wang J, et al. Object-oriented method based on Classification of geomorphic type in the Tibet Plateau and adjacent regions[J]. *Mountain Research*, 2017,35(1):1-8. ]
- [15] Wood J. The geomorphological characterization of digital elevation models[D]. Leicester, UK.: University of Leicester, 1996.
- [16] 顾留碗,王春,李鹏,等.利用DEM提取山顶点精度研究[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2016,41(1):131-135. [Gu L W, Wang C, Li P, et al. A model of extracting surface peak height precision based on DEM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016,41(1):131-135. ]
- [17] 陈盼盼,张友顺,王春,等.基于DEM的山顶点快速提取技术[J].*现代测绘*,2006,29(2):11-13. [Chen P P, Zhang Y S, Wang C, et al. Method of extracting surface peaks based on DEM[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2006,29(2):11-13. ]
- [18] Menduni G, Pagani A, Rulli M C, et al. A non-conventional watershed partitioning method for semi-distributed hydrological modeling: the package aladhyn[J]. *Hydrology Process*, 2002,16(2):277-291.
- [19] Mantilla R, Gupta V K. A GIS numerical framework to study the process basis of scaling statistics in river networks[J]. *IEEE Geoscience Remote Sense Letter*, 2005,2(4):404-408.
- [20] 晏实江,汤国安,李发源等.利用DEM边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取[J].*武汉大学学报·信息科学版*, 2011,36(3):363-367. [Yan S J, Tang G A, Li F Y, et al. An edge detection based on methods for extraction of loess shoulder-line from grid DEM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011,36(3):363-367. ]
- [21] 周毅,汤国安,羽羽,等.引入改进Snake模型的黄土地形沟沿线连接算法[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2013,38(1):82-85. [Zhou Y, Tang G A, Xi Y, et al. A shoulder line connection algorithm using improved snake model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013,38(1):82-85. ]
- [22] 黄培之.提取山脊线和山谷线的一种新方法[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2001,26(3):247-252. [Huang P Z. A new method for extracting terrain feature lines from digitized terrain data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001,26(3):247-252. ]
- [23] 熊汉江,李秀娟.一种提取山脊线和山谷线的新方法[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2015,40(4):498-502,515. [Xiong H J, Li X J. A new method to extract terrain feature lines [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015,40(4):498-502,515. ]
- [24] 罗明良,汤国安.地貌认知及空间剖分的山顶点提取[J].*测绘科学*,2010,35(5):126-127,253. [Luo M L, Tang G A. Mountain peaks extraction based on geomorphology cognitive and space segmentation[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010,35(5):126-127,253. ]
- [25] 罗寅.宏观山脉线抽取及其辅助技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012. [Luo Y. The research on Macro Mountain Lines extraction and its assistant technology [D]. Xi'an: Master Thesis of Xi'an University of Architecture and Technology, 2012. ]
- [26] 刘俊杰,秦奋,赵芳,等.秦巴山地山体基面高度的提取及分布[J].*地球信息科学学报*,2018,20(10):1457-1466. [Liu J J, Qin F, Zhao F, et al. Extraction and distribution of mountain base elevation in the Qinling-Daba Mountains[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(10):1457-1466. ]
- [27] 周成虎,程维明,钱金凯,等.中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究[J].*地球信息科学学报*,2009,11(6):707-724. [Zhou C H, Cheng W M, Qian J K, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:10 000 in China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2009,11(6):707-724. ]
- [28] Fisher P, Wood J, C T. Where is Helvellyn? Fuzziness of multi-scale landscape morphometry[J]. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 2004,29:106-128.
- [29] 张新长,曾广鸿,张青年,等.城市地理信息系统[M].北京:科学出版社,2001. [Zhang X C, Zeng G H, Zhang Q N, et al. urban geographic information system[M]. Beijing: Science Press, 2001. ]
- [30] 杨琳,朱阿兴,秦承志,等.运用模糊隶属度进行土壤属性制图的研究——以黑龙江鹤山农场研究区为例[J].*土壤学报*,2009,46(1):9-15. [Yang L, Zhu A X, Qin C Z, et al. Soil property mapping using fuzzy membership: A case study of a study area in heshan farm of heilongjiang province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009,46(1):9-15. ]
- [31] 欧名豪,李武艳,刘向南,等.区域城市化水平的综合测度研究——以江苏省为例[J].*长江流域资源与环境*,2004,13(5):408-412. [Ou M H, Li W Y, Liu X N et al. Comprehensive measurement of district's urbanization level: A case study of jiangsu province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004,13(5):408-412. ]
- [32] 苍学智,汤国安,仲腾,等.山顶点类型及其形态特征数字表达[J].*南京师大学报(自然科学版)*,2010,33(1):136-140. [Cang X Z, Tang G A, Zhong T, et al. Classification of peaks and digital expression of their spatial pattern[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2010,33(1):136-140. ]
- [33] 四川省测绘地理信息局标准地图[DB/OL].四川测绘地理信息局: <http://scsm.mnr.gov.cn/nbzdt.htm>. [Standard Map of Sichuan Provincial Bureau of Surveying and Mapping[DB/OL]. Sichuan Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation: <http://scsm.mnr.gov.cn/nbzdt.htm>. ]
- [34] Schmidt J, Hewitt A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position [J]. *Geoderma*, 2004,121(3):243-256.
- [35] Smith B, Mark D M. Do mountains exist? Towards an ontology of landforms[J]. *Environment and Planning B*, 2003,30(3):411-428.