

引用格式:黄楠,杨昕,刘海龙.基于等高线空间关系的鞍部点提取方法[J].地球信息科学学报,2020,22(3):410-421. [Huang N, Yang X, Liu H L. A method of saddle point extraction based on contour spatial relationship[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):410-421.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190572

基于等高线空间关系的鞍部点提取方法

黄楠^{1,2,3}, 杨昕^{1,2,3*}, 刘海龙^{1,2,3}

1. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 南京210023;
2. 南京师范大学地理科学学院, 南京210023;
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京210023

A Method of Saddle Point Extraction based on Contour Spatial Relationship

HUANG Nan^{1,2,3}, YANG Xin^{1,2,3*}, LIU Hailong^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210023, China;
2. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: The saddle point is one of the important terrain feature points that reflects the fluctuation of the surface morphology. Accurate extraction of saddle points is beneficial to the analysis of spatial relationship and structural feature of terrain. Existing saddle point extraction methods are usually directly based on regular grid DEMs data which not have topological relation, unable to take into account the spatial topological relationship between saddle point and surrounding terrain and the influence of complex terrain on them. Many false feature points which are not in the saddle region will be extracted, and saddle points in some key areas also will be ignored. Thus, this paper designs an algorithm for extracting saddle points based on contour data according to the morphological characteristic of saddle points. This algorithm makes use of the feature of contour closure, converts contour lines into contour polygons data according to certain rules, and then uses the adjacent topological relations between contour polygons to recursively search and automatically extract the saddle-points. The experimental results show: (1) The number and position of saddle points are significantly related to the size of the contour interval. Within a certain range of scales, the smaller the contour interval is, the more saddle points are extracted, and the position accuracy is gradually improved. (2) Compared with the method based on regular grid DEMs data extraction, this method can more effectively filter many false feature points which are not in the saddle region, improve the accuracy of saddle point extraction, and also reduce the complexity of the saddle point extraction algorithm. In addition, DEM scale is selective for saddle point extraction. Compared with incremental contour method to extract saddle points, the idea is to find the intersection point which is the saddle point by extending the adjacent pseudo-saddle point contour line to the junction, this way has the advantage of more accurate position. However, this method requires DEM data with high precision, and when applied to 5-meter spatial resolution DEM data, most saddle points can't be extracted. The method in this paper is to use the midpoint of the nearest point in the two peaks as the saddle point, whose point position is not completely

收稿日期:2019-09-30;修回日期:2019-12-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(41771415、41930102)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41771415, 41930102.]

作者简介:黄楠(1995—),女,安徽六安人,硕士生,主要从事数字地形分析研究。E-mail: 2975594935@qq.com

*通讯作者:杨昕(1976—),女,陕西西安人,教授,主要从事数字地形分析和空间分析研究。E-mail: xxinyang@njnu.edu.cn

accurate, resulting in a certain error in spatial position accuracy. However, it can identify the majority of saddle points effectively, which has an advantage over the method of extracting saddle points mentioned above. Thus, the method in this paper can effectively improve the integrity of saddle point extraction and is more suitable for the DEM scale data (5 m DEM) in this paper.

Key words: contour; saddle point; topological relationship; regular grid DEMs; recursion; DEM scale; automatic extraction; terrain feature points

***Corresponding author:** YANG Xin, E-mail: xxinyang@njnu.edu.cn

摘要:鞍部点是反映地表形态起伏变化的重要地形特征点之一,准确地提取鞍部点有利于地形的空间关系和结构特征分析。现有的鞍部点提取方法通常是直接基于规则格网DEM数据,无法顾及鞍部点与周围地形的空间拓扑关系和复杂地形对其的影响,不仅产生大量的伪鞍部点,而且忽略一些关键地区的鞍部点。本文根据鞍部点的地形形态特征,设计了一种基于等高线数据的鞍部点提取算法。该算法利用等高线闭合的特征,将等高线按照一定规则转成等高面数据,再利用等高面之间的相邻拓扑关系实现递归查找并自动提取鞍部点。实验结果显示:①鞍部点的数量和位置与等高距的大小显著相关,在一定尺度范围内,等高距越小,提取出鞍部点越多,位置精度也逐渐提高;②与基于规则格网DEM数据提取方法相比,该方法能更有效的过滤大量伪鞍部点,提高了鞍部点的提取精度,同时也降低了鞍部点提取算法的复杂度;与基于等高线的增量缓冲方法(Incremental Buffering Algorithm)相比,本文的方法能有效提高鞍部点提取的完整性,更适用于本文DEM的尺度即5 m DEM数据。

关键词:等高线;鞍部点;拓扑关系;规则格网DEM;递归;DEM尺度;自动提取;地形特征点

1 引言

鞍部点是重要的地形控制点之一,它与山顶点、山谷点、山脊线、山谷线等一起构成了地形起伏变化的骨架结构。在数字地形分析中对这些地形特征点、线的研究具有很重要的意义^[1]。其中,鞍部点与相邻山顶点的高程差往往作为判别地面正地形起伏特征的重要指标,成为基于地形特征点簇的地貌模式识别的依据之一^[2]。此外,探究鞍部点与其他地形特征点间的空间格局特征,对地形特征结构及其模式研究具有重要的参考意义^[3]。因此,国内外学者针对自动、高效识别与提取鞍部点进行了深入研究。

目前对于鞍部点自动提取的方法多是基于规则格网DEM来实现的。其中,基于移动分析窗口来实现鞍部点的提取方法是一种常用的方法,它通过中心栅格与相邻栅格的局部地形参数高差比较实现提取,其计算效率较高,但是难以顾及整体地形变化,从而产生大量噪声,提取精度不够理想^[4-7]。钟业勋等^[8]根据拓扑学理论,给出了鞍部的数学定义并提出利用山脊线与反向谷底线相交提取鞍部的方法,虽然减少了传统基于移动分析窗口识别产生的噪声,但处于地形高处的山谷线会因其汇水量较小而缺失,提取的反向谷底线不一定能延伸到山脊线,从而造成鞍部点提取缺失情况^[9-10]。熊礼阳等^[5]

认为鞍部点位于流域边界上,然后依据鞍部点的定义,即垂直2个方向线上一个方向凸起而一个方向凹下的地形特征点,进行局部窗口分析,再依据流域及子流域的层次等级关系,提取出多级鞍部点。然而,实验结果依赖于分析窗口大小的设定,同时不同地形下汇流累积阈值设置和最佳的分析窗口大小还需要大量的实验确定^[11-12]。张维等^[13]、朱庆等^[14]将鞍部点视作流域边界线与两侧沟谷线延长线的交点,利用DEM汇流模拟分别提取正地形流域边界线和反地形的山脊线(即原始地形中,鞍部点两侧的沟谷线的连线),其交点即为鞍部点,该方法的提取精度有较大的提高,但是该算法在利用流域分水线与正地形叠加的计算过程中产生了破碎山脊线,给鞍部点提取结果带来了误差,而且获取正地形的邻域分析的窗口设置会影响山脊线的破碎程度,增加了算法的复杂度。另外,有学者通过水文分析提取出山脊线和山谷线的交点,再利用鞍部周围坡度值较小、坡度变化率高的特点去除了一部分伪鞍部点,但提取精度仍取决于选取的汇流阈值和坡度变化率阈值^[15]。

综上,基于规则格网DEM提取鞍部点的方法较为丰富且取得了较好的效果,但是由于涉及到邻域分析及水文分析,分析窗口大小和汇流累积阈值的选择都不可避免的给提取结果带来了不确定性。此外,规则格网DEM数据结构没有拓扑关系,

无法判定鞍部点与周围山脊线、山谷线以及山顶点之间的空间关系,从而无法对大量伪鞍部点进行有效判断。而等高线是一种空间关系明晰、特征表达有效的传统地形描述手段,已发展了完善的基于等高线的地形判读方法^[16]。基于空间认知和等高线簇结构建立等高线树的方法,使计算机识别出等高线之间的相邻、嵌套、层次等拓扑关系成为可能^[17-19],也为准确判断地形鞍部点提供了基础。其中,局部等高线树法(Localized Contour Tree Method)最初由 Wu 等^[18]提出,用来提取具有复杂几何和拓扑关系的地表洼地。Wu 等^[20]也使用该方法描述森林树冠之间的拓扑结构,进而分割出单个树冠。因此,依据 5 m 空间分辨率 DEM 数据,本文改进该方法,根据鞍部点特殊的地形特征,在分析鞍部点与等高线及其所围区域的拓扑关系的基础上,实现了鞍部点的自动识别与提取,提高了鞍部点的提取精度,同时也降低了鞍部点提取算法的复杂度。

2 研究方法

2.1 鞍部点提取算法原理

鞍部具有特殊的地貌形态,其位于相邻两山头之间呈马鞍形的低凹的较为平缓部位^[5]。吴凡等^[21]通过等高线拓扑学理论分析了等高线之间、等高线与所围区域之间的拓扑关系(图1)。设 s_1 、 s_2 、 s_3 为 3 条彼此相邻的闭合等高线,若 s_1 与 s_2 、 s_3 之间的空间拓扑关系为包含关系, s_2 与 s_3 为并列关系,则在 s_1 与 s_2 、 s_3 之间的区域存在鞍部 R1。可以看出,实际地形的整体走向影响着鞍部的空间分布^[22]。

因此,本文提取鞍部点的基本思路为:鞍部点必定位于 2 个并列等高面之间,且他们被同一个相邻的等高面所包含。基本步骤为:①将等高线转换为等高面集合;②搜索确定最外围等高面,递归查找是否有包含的并列等高面;③确定符合条件的并

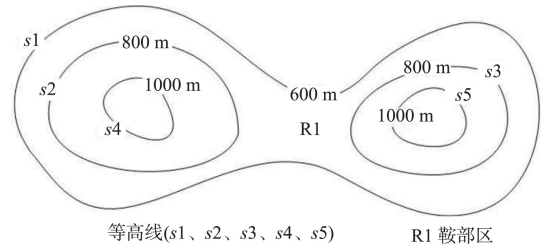


图1 鞍部等高线拓扑关系示意
Fig. 1 The schematic diagram of the topological relationship between saddle point and contour

列等高面之间的鞍部点位置。

2.2 鞍部点提取算法实现

依据等高线在描述地形时必须遵循的一些规则,理论上任何一条等高线必定自封闭^[23]。本文算法利用等高线自封闭的特征,在 ArcGIS10.2 软件环境下按照一定规则对不同等高距的等高线分别进行线转面处理,得到等高面集合,然后利用等高面之间的相邻拓扑关系实现递归查找并自动提取鞍部点,提取流程如图2所示。

(1) 等高面与最外围等高面的确定。

首先根据设置的等高距从原始 DEM 数据中提取等高线,将等高线数据按照一定规则转换成面。具体而言即是利用等高线数据不相交的特征(陡崖等特殊地形除外),按照一条或多条等高线之间所形成的封闭区域生成面,如图3所示,D4 环状区域为 X4 等高线和 X5 等高线之间的封闭区域,并记录 X4 等高线的高程属性,D5 区域为 X5 等高线形成的封闭区域,同时记录 X5 等高线的高程属性。

对等高线进行线转面预处理后得到等高面集合,然后,从中寻找最外围等高面。对所有等高线顺时针方向进行检索,同时在属性表中记录左多边形和右多边形,如图3所示,对等高线 X5 进行检索,在属性表中记录左多边形为 D4,右多边形为 D5。等高线检索完成后,属性表中左多边形为空的等高线所对应的等高面即为最外围等高面。

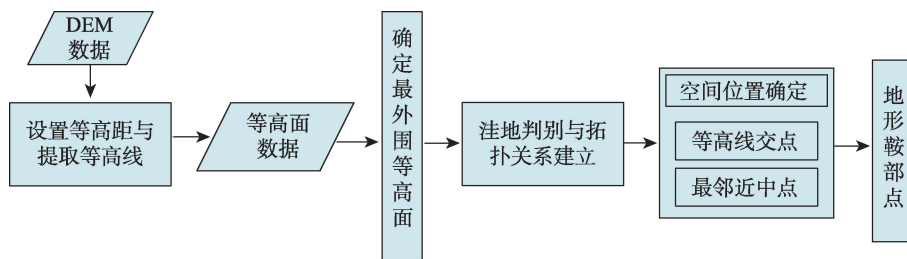


图2 鞍部点提取流程
Fig. 2 Process of saddle point extraction

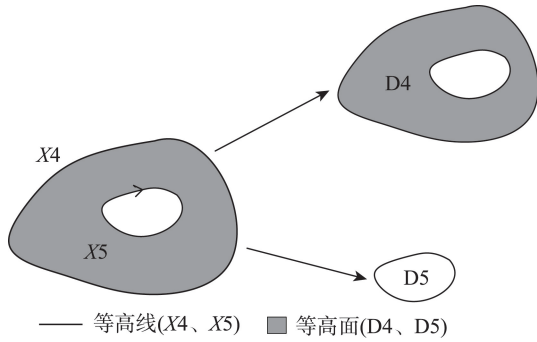


图3 等高线转面及最外围等高面示意

Fig. 3 The schematic diagram of contour plane from contour and outermost contour

(2)洼地判别与拓扑关系分析。

假设等高线集合为 S ,最外围等高面为 A ,获取最外围等高面为 A 后,将 A 标记为已处理,以 A 为基础从 S 中查找与 A 具有相邻关系且处于未处理状态的等高面 B ,判断 B 的高程属性是否大于 A 后决定是否将 B 加入List数组中,该步骤是对复杂地形中的洼地进行识别和剔除。继遍历 S 后,判断List数组内元素的数量 Na ,如果 $Na>1$,说明与 A 相邻的等高面之间包含可能的鞍部点,然后遍历List数组元素,确定鞍部点的空间位置,提取完成后,以 B 作为最外围等高面继续进行递归查找并提取鞍部点,具体算法流程如图4所示。

(3)鞍部点空间位置确定

依据鞍部点所在区域是否为平面及数据精度

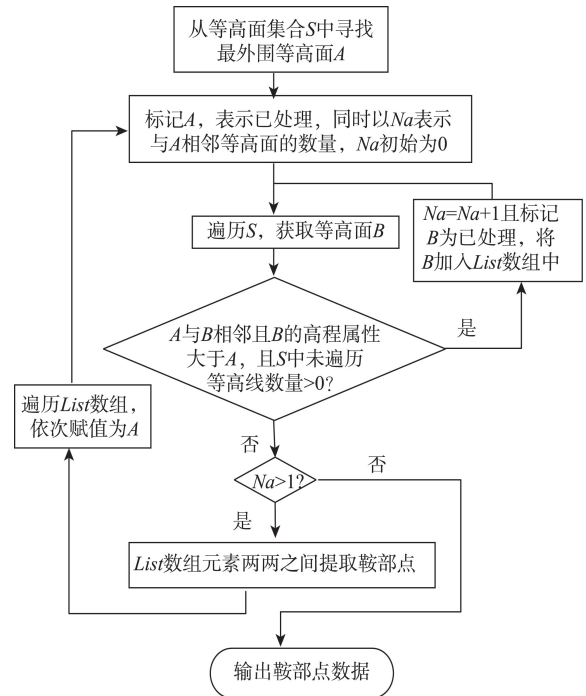


图4 利用拓扑关系提取鞍部点算法流程

Fig. 4 Flowchart of the saddle point extraction based on topological relationship

限制,可分为2种情况:①当鞍部点所在位置为非平面时,且DEM表达精度较高时,在合适的等高距条件下,出现等高线 $M1$ 、 $M2$ 相交于鞍部点的情况,如图5(a)所示,此时取其交点 M 为鞍部点;②当鞍部点所在区域为平面时,即使等高距再小,也不会

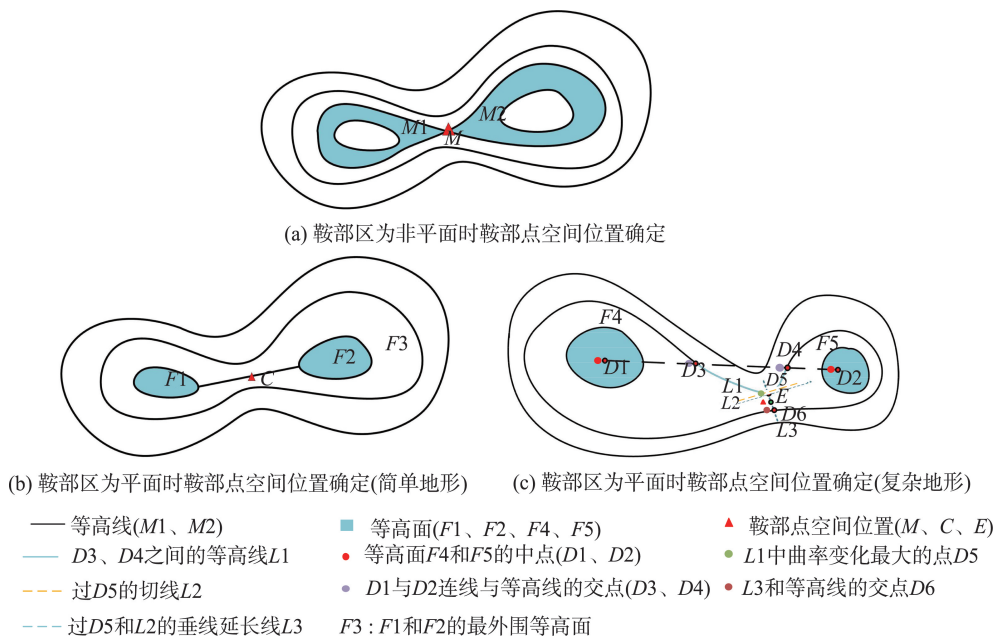


图5 鞍部点空间位置确定示意

Fig. 5 The schematic diagram of determination of saddle point spatial location

出现等高线相交情况,此时采用相邻等高面最近距离的中点作为鞍部点。此时又可分为2种情况:①当鞍部地形比较简单时,如图5(b)所示,以 $F3$ 为最外围等高面的基础上,通过等高面之间的相邻拓扑关系可以找到未被标记的 $F1$ 和 $F2$ 等高面,但 $F1$ 和 $F2$ 并未相交。此时,鞍部点可看作两座山峰的山脊线上的中点,即 C 点作为鞍部点;②当鞍部地形相对复杂时,如图5(c)情况下,2座山峰之间的鞍部区可能会因为两侧沟谷侵蚀强度不同而产生的不规则情况,若List数组同时存在等高面 $F4$ 和 $F5$,按照上面方法确定的鞍部点位置是不正确的。此时,本文的算法在确定 $F4$ 、 $F5$ 的基础上,先找出2个等高面的中点 $D1$ 、 $D2$,连接后会与最外围等高面交于 $D3$ 、 $D4$ 两点,从最外围等高面上获取 $D3$ 、 $D4$ 之间的连线 $L1$ 后,再从 $L1$ 中找到曲率变化最大的点 $D5$,然后获取过 $D5$ 的切线 $L2$,再获取过 $D5$ 且垂直于 $L2$ 的垂线延长线 $L3$ 与最外围等高面交于 $D6$ 点,最后连接 $D5$ 、 $D6$ 取其连线的中点 E 作为复杂地形下鞍部点的空间位置。

3 实验区概况与数据源

实验区位于江西省北部庐山地区中,如图6(a)所示。实验区1面积为 3 km^2 、实验区2面积为 4 km^2 ,实验区内地形起伏较大,不同层次山峰分布明显,有利于人工判读鞍部点用于结果验证。

实验数据是分辨率为 5 m DEM数据,来源于虚拟地理环境教育部重点实验室^[24],基于其生成的高程数据为基础数据,实现基于等高线的鞍部点提取。此外,该DEM数据还用做栅格方法的鞍部点提取,进而与本文方法进行对比分析。

验证数据来自基于DEM和等高线数据的鞍部点人工判读,由于等高线数据是通过DEM生成的,所以人工判读的结果具有可评价性。结果如图6(b)和图6(c)所示,实验区1和2的鞍部点分别为50个和37个,该数据用于本文鞍部点提取结果的验证。

4 结果分析与讨论

4.1 实验结果

由于等高线具有规则清楚、空间关系明确的地形表达特点,利用等高线之间的相互关系、鞍部点与

等高线之间的拓扑关系可有效过滤掉大量伪鞍部点。表1为基于 5 m 等高距的等高线数据,该算法提取鞍部点的精度统计结果,与目视解译的结果对比可以看出本文算法的结果在两个实验区内没有出现伪鞍部点和误判点,提取的正确率达到100%。

图7(a)为该算法基于 5 m 等高距的等高线数据提取地形鞍部点的结果图(以实验区1为例),图上嵌套了人工判读结果进行对比分析。可以看出,虽然该方法提取的鞍部点基本符合地学认知,提取的大部分鞍部点的空间点位比较准确,但在实际地形中,算法中利用两座山峰中最近距离的中点确定的位置不一定会处于山脊线和山谷线的交点上,即不一定是鞍部点最适宜的位置,如图7(b)所示。值得注意的是,地形鞍部往往是一个区域而不是一个点,鞍部点是将地形鞍部区域抽象为一个点,不同的人标注鞍部点时可能会有不同的结果,从而造成一些差异。同样,不同的提取方法也会产生不同的鞍部点位置,详见第4.2节。

4.2 等高距对鞍部点提取的影响

本文算法是基于等高线数据来提取鞍部点,由于直接获取等高线数据比较困难,且从地形图上只能得到固定等高距的等高线数据,考虑到大量DEM数据的获取简单方便,可以利用DEM数据来派生具有不同等高距的等高线数据。其中,在派生等高线数据时发现等高距大小的设置对结果是有影响。为了比较采用不同等高距的等高线数据所提取的鞍部点数量的完整性和空间位置的准确性,本文在 5 m 分辨率规则格网DEM数据的基础上分别派生出以 0.5 m 为间隔的 $0.5\sim 10\text{ m}$ 的一系列等高距的等高线数据,分别提取鞍部点。

4.2.1 等高距对鞍部点数量的影响

图8为等高距与鞍部点提取数量之间的关系,可以看出,其统计趋势在2个实验区相同,即等高距与提取的鞍部点数量呈强负线性关系。同时,图9(a)、(b)、(c)分别表示了局部实验区内 10 m 、 5 m 、 2.5 m 等高线中所能表达的地形山峰情况,可以发现,当等高距减小时,地形局部的小山峰逐渐增加,更多层次的鞍部能够显现出来。因此,随着等高距的减小,各实验区提取出的鞍部点的数量也逐渐增多。

Wu等^[20]使用LiDAR数据提取单个树冠时,提出了确定鞍部点位置的方法,其认为在二维等高线

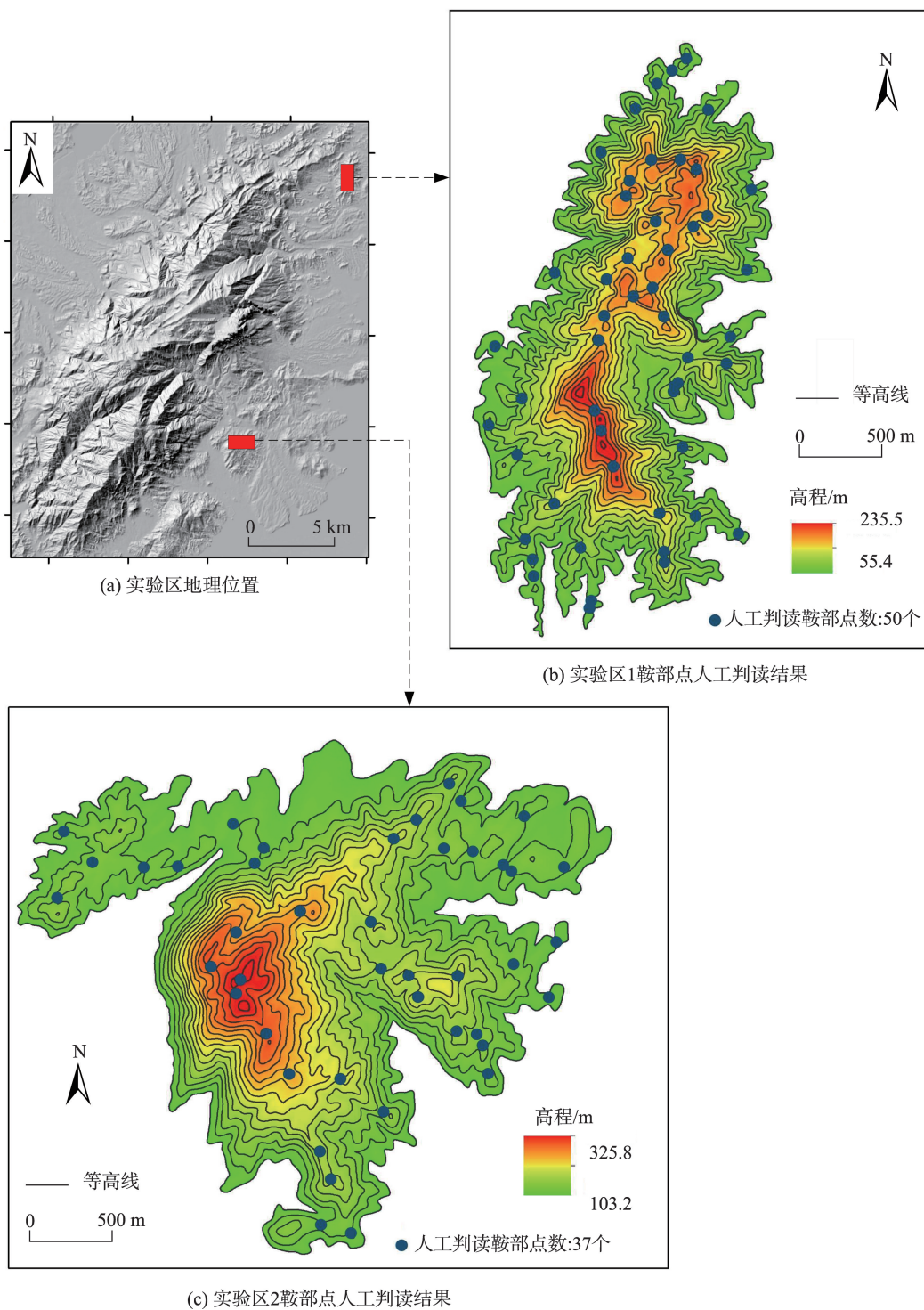


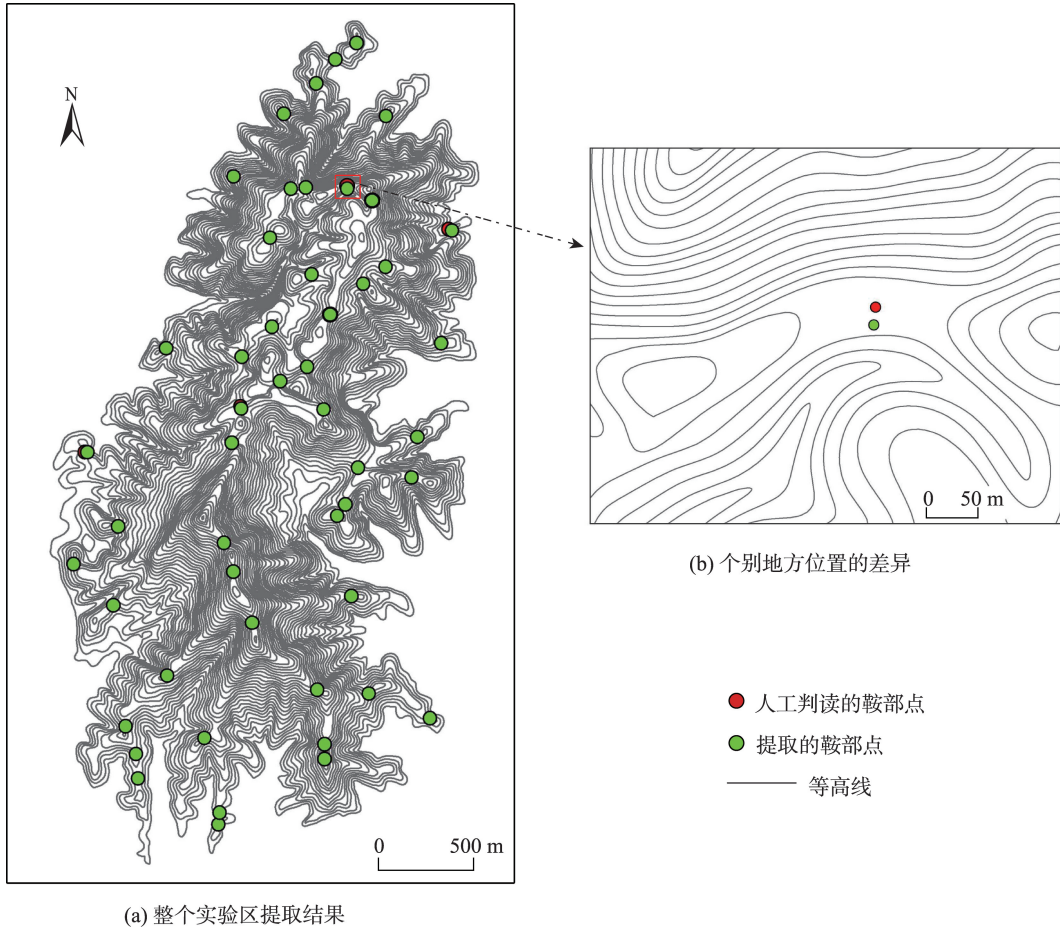
图6 实验区位置及实验数据

Fig. 6 Locations of study areas and study data

表1 鞍部点提取精度统计

Tab. 1 Accuracy statistics of the saddle point extraction

实验区	正确点数/个	提取点数/个	漏判点数/个	误判点数/个	提取正确率/%
实验区1	50	50	0	0	100
实验区2	37	37	0	0	100



(a) 整个实验区提取结果

(b) 个别地方位置的差异

图7 实验区1鞍部点提取结果对比

Fig. 7 Comparison of the results of saddle point extraction in study sample area 1

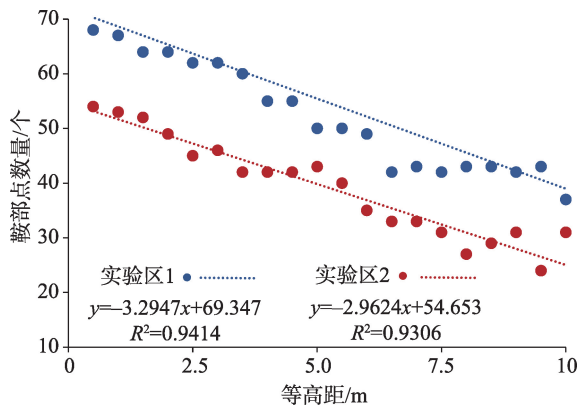


图8 鞍部点提取数量与等高距的关系

Fig. 8 Relationships between the extraction quantity of saddle points and contour interval

地图中,如果2条具有相同高程的等高线相互接触,接触点则视为鞍部点。在确定鞍部点位置时,其增量缓冲算法(Incremental Buffering Algorithm)通过扩张相邻的伪鞍点等高线至相接,得到的交点即为鞍部点。将该方法应用于本文使用的5 m空间分辨

率的DEM数据,表2为不同等高距的实验结果(以实验区1为例)。可以看出,不同等高距下能找到等高线相交的鞍部点数量占鞍部点总数的约1/3,还有大部分鞍部点是该方法漏掉的。其原因是该方法受制于DEM的表达精度,对于5 m空间分辨率的DEM,其一个格网内的地形差异无法表达,即使再缩小等高距,仍不会出现相交的情况。但对于高分辨率的LiDAR数据,生成的DEM分辨率更高,地形表达更为精细,所以上述方法应用效果较好。而在应用于低分辨率的DEM数据时,上述方法会产生大量鞍部点漏取的情况。当等高线未相交时,本文通过找出这些等高线之间最邻近距离中点的方法来鞍部点位置,虽然其点位不一定完全正确,但本文的方法是漏取大量鞍部点。因此,针对该本文使用的5 m空间分辨率的DEM数据,本文的方法更为适用些。

4.2.2 等高距对鞍部点空间位置的影响

对于通过找等高线之间最邻近距离中点的方

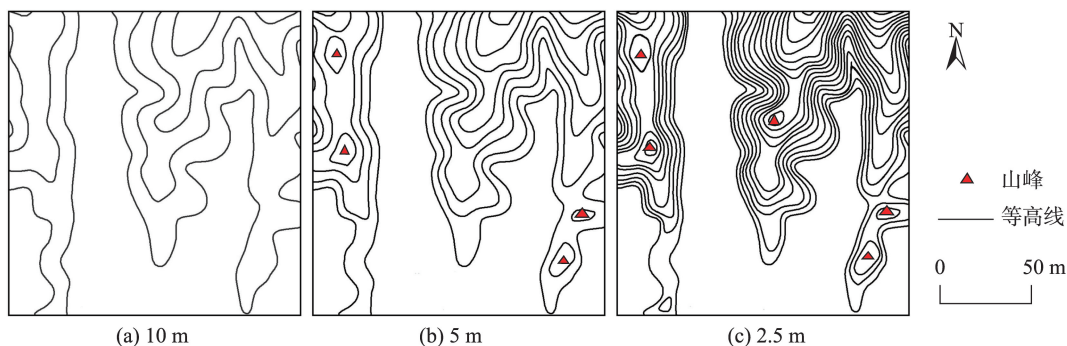


图9 不同等高距的等高线数据含有不同数量山峰

Fig. 9 The schematic diagrams of contour data with different contour interval containing different numbers of peaks

表2 增量缓冲算法提取鞍部点数统计

Tab. 2 Statistics of incremental buffering algorithm extraction of saddle point

	等高距/m									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
提取出鞍部点数/等高线相交数	18	17	18	16	15	14	12	13	13	11
漏提取鞍部点数/等高线未相交数	49	47	43	39	35	36	31	30	29	26
鞍部点总数/个	67	64	61	55	50	50	43	43	42	37

法来确定鞍部点位时,等高距的变化将会影响最小距离的变化,使得基于不同等高距下会提出具有不同空间点位的鞍部点,如图10(a)所示。图10(b)、10(c)、10(d)分别表示算法基于4 m、5 m、6 m等高距的等高线数据提取鞍部点的空间位置,通过对比可以发现随着等高距的减小,用于计算鞍部点的两条等高线到实际鞍部点的距离越来越小,提取出的

鞍部点的空间位置也就越来越逼近实际位置。由于该实验中不同等高距的等高线数据来源于5 m空间分辨率的DEM,所提取也是基于这个尺度DEM能显示的鞍部。在此基础上,随着等高距减小,等高线越密集,更多地形细节信息能被显示出来,使得用来确定位置的范围减少,提取的鞍部点的空间位置就相对越准确。

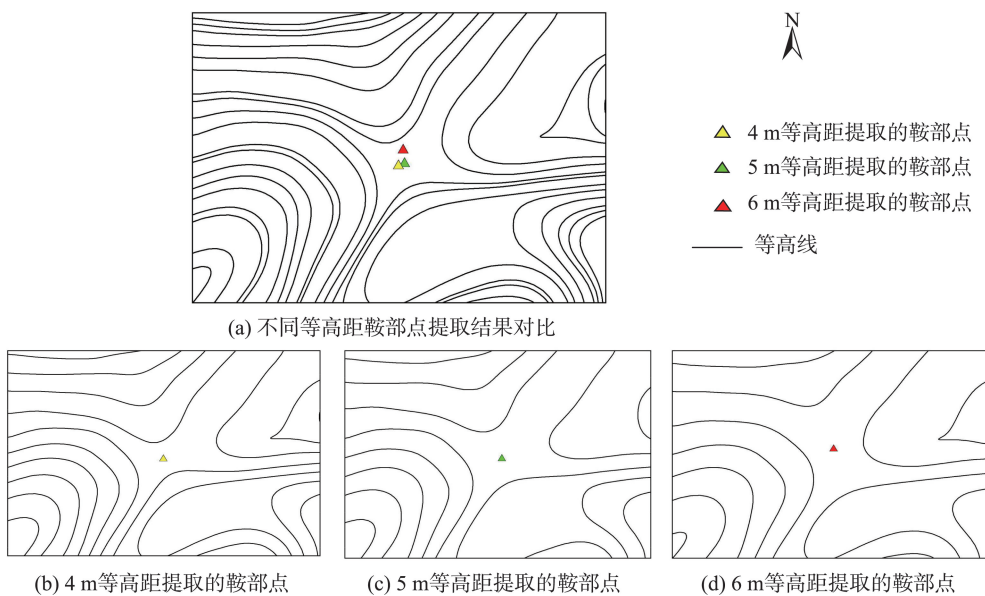


图10 不同等高距提取的鞍部点空间位置对比

Fig. 10 Comparison of spatial positions of saddle points extracted by contour data with different contour interval

4.3 与基于格网DEM提取方法对比

GIS中基于规则格网DEM数据进行水文分析获取更多的水文信息是DEM数字地形分析中的一个重要方面^[25]。鞍部具有的特殊地形特征可被认为是原始地形中的山脊和山谷会合的地方,山脊线和山谷线的提取实质上也是分水线与汇水线的提取,因而基于地表水流的水文分析方法来提取鞍部点也是栅格领域分析中提取地形特征点线适用的较多方法之一。

为了验证本文算法提取鞍部点的效果,实验中选用基于地表水流的水文分析方法进行对比分析。其中,基于地表水流的水文分析方法提取鞍部点的主要思路为:先基于DEM数据汇流模拟提取出山脊线,利用其与正地形(局部区域内相对高起

的地形)相交,得到过滤了负地形影响的山脊线,再通过差值计算完全翻转原地形生成反地形,并基于反地形的水流方向来填洼提取集水区域,集水区域边界即反地形的山脊,即原地形山顶控制区域的边界线,最后通过将山脊线与原地形山顶控制区域边界线拓扑相交实现鞍部点的提取。

由于2种方法提取的结果是嵌套5 m等高距的等高线数据进行对比分析,所以本文只统计了2种方法在相同等高距下相同位置处的鞍部点个数(表2),提取结果如图11(a)所示(以实验区1为例)。

(1)冗余鞍部点对比。在朝着一个方向延伸的山脉中,一个鞍部区连接2个山顶,所以山顶点与鞍部点是相间存在的,2个山顶点之间只会有一个鞍部点^[26]。从图11(b)和表2可以看出,基于地表水流

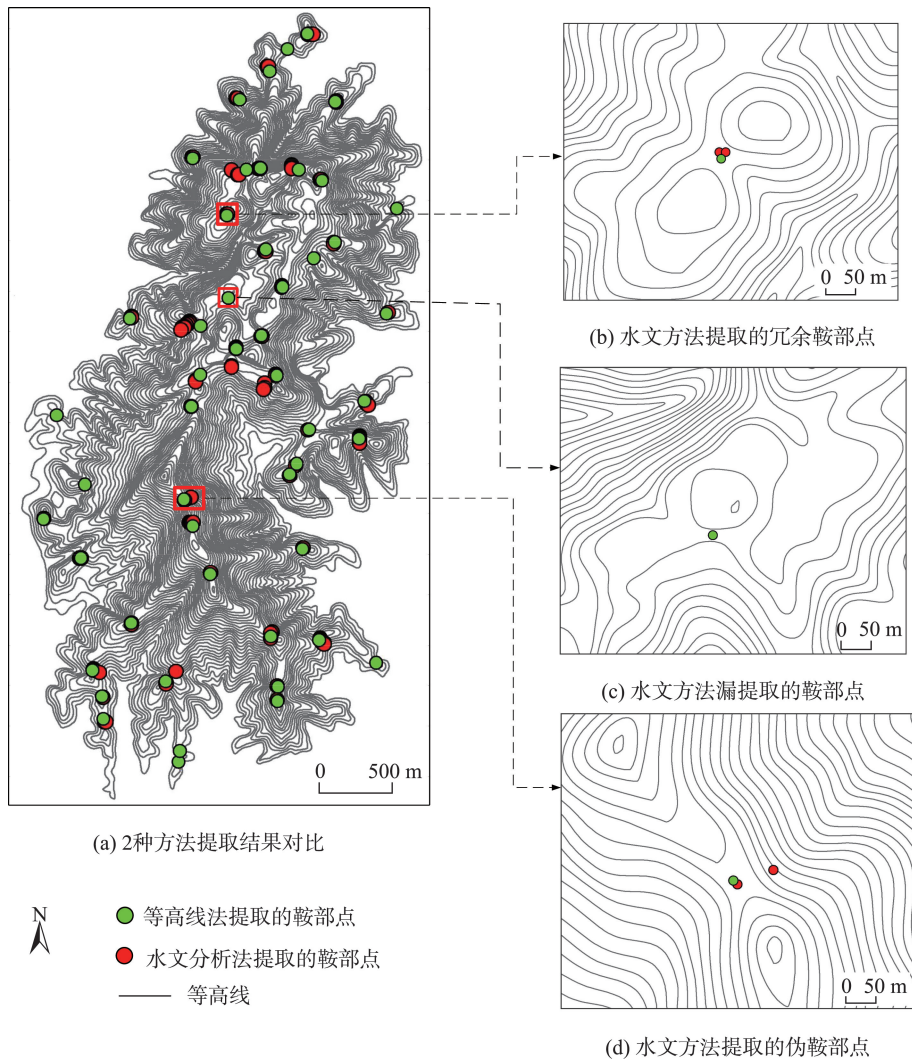


图11 实验区1不同方法提取结果对比

Fig. 11 Comparison of extraction results of different methods in study area 1

法提取的结果中出现2个山顶之间有冗余鞍部点存在的现象,并不符合鞍部点的地貌认知规律;本文方法是以等高线与鞍部点之间的拓扑关系为原则:当两条并列且相邻的等高线被另一条相邻的等高线包含时,该两条等高线之间就有一个鞍部^[21],因此能够保证地形特征点线之间的空间对应关系,不会产生任何的冗余鞍部点。

(2)漏判鞍部点对比。从表3的统计结果可以看出,基于地表水流法提取时,存在较多关键点位上的鞍部点缺失的情况(图11(c))。相比之下,本文的方法基本不会产生漏判,其准确率在2个实验区达到100%。进一步分析发现,直接基于规则格网DEM数据通过汇流模拟方法提取山脊线,在利用其与正地形叠合时虽然得到过滤了负地形影响的山脊线,但会造成最终提取的山脊线不连续,产生的破碎山脊线会导致一些地区鞍部点的漏判与错判。

(3)伪鞍部点对比:通过图11(d)和表3可以看出,2种方法提取鞍部点数量差异非常明显,其中基于地表水流的水文分析法提取的鞍部点数量远多于本文基于等高线法提取的数量。进一步研究发现,正地形是通过栅格窗口进行平均值的邻域分析后,与原始DEM相减并以0为界进行重分类后得到的。虽然实验中对不同实验区分别选择不同栅格窗口提取,通过对比5 m等高距的等高线数据后选取了最佳栅格窗口,但最后得出的山脊线并未完全消除负地形的影响,从而提取的点位于反地形的山脊线上但并不位于实际山脊线上。因此,实验选取的窗口大小对正地形的提取结果具有一定影响,造成基于地表水流方法提取的实验中产生了大量的伪鞍部点。而本文方法使用的是等高线数据,不会受栅格邻域分析视野的局限,提取的结果有效的过滤了大量伪鞍部点,如图11(d)所示。同时本算法不需要反复实验确定不同地形条件下窗口大小的设置,简单易操作。

5 结论与讨论

本文基于鞍部点的空间分布特征,在分析等高线与所围区域之间的拓扑关系特征的基础上,提出一种基于等高线空间关系的鞍部点自动识别与提取算法。该提取方法充分考虑鞍部点的地貌认知规律,以相邻且并列的等高线之间的空间拓扑关系为原则来提取,与基于规则格网DEM数据提取方法相比,能过滤更多的伪鞍部点,同时顾及了复杂地形下鞍部点的分布情况,提取的准确率高,是一种较为有效的鞍部点提取方法。该提取方法以等高线数据直接提取,简单易行,也为未来提取地形特征点的研究提供了一种新的思路。

本文实验结果得出以下结论:①本文方法考虑了地形特征点之间的空间对应关系,既能有效过滤基于水文方法产生的伪鞍部点,又不会造成关键点位上的鞍部点缺失的情况,提高了鞍部点提取的完整性与准确性;②基于同一分辨率DEM派生的等高线数据中,在一定的尺度范围内,等高距大小与鞍部点的提取数量呈显著的线性相关,随着等高距减小,鞍部点提取数量逐渐增加;等高距的大小也会对鞍部点的位置产生影响,等高距越小,鞍部点位置也越精确。

此外,DEM尺度对鞍部点提取方法具有选择性。目前,大多数有关鞍部点提取的文献中,采用的DEM空间分辨率多为5 m或25 m,相对他们的方法,本文的方法的优势在于能够过滤更多的伪鞍部点。Wu等^[20]使用Lidar采集的数据提取树冠时,提出了鞍部点提取方法,其思路是通过扩张相邻的伪鞍点等高线至相接,找出相交的点即为鞍部点,具有位置更为准确的优点,但是该方法需要高精度的DEM数据,应用于5 m空间分辨DEM数据时,会漏掉大多数鞍部点。本文的方法是利用2座山峰中最近点的中点作为鞍部点,其点位不一定完全准确,造成空间位置精度具有一定的误差。但是,能

表3 不同方法在实验区提取的鞍部点数对比

Tab. 3 Comparison of saddle points extracted by different methods in the study area

实验区	分析方法	提取点数/个	漏判点数/个	伪鞍部点数/个	冗余鞍部点数/个
实验区1	水文分析法	85	9	18	26
	基于等高线法	50	0	0	0
实验区2	水文分析法	66	7	16	20
	基于等高线法	37	0	0	0

有效识别出绝大多数鞍部点,这一点相比上述提取鞍部点的方法具有优势。今后要进一步提高该方法面向大范围数据的计算效率。此外,针对等高线不闭合情况下的鞍部点提取开展研究。

参考文献(References):

- [1] 汤国安,李发源,刘学军.数字高程模型教程[M].北京:科学出版社,2010. [Tang G A, Li F Y, Liu X J. Digital elevation model tutorial[M]. Beijing: Science Press, 2010.]
- [2] Fisher P, Wood J, Cheng T. Where is Helvellyn? Fuzziness of multi-scale landscape morphometry[J]. Transactions Institute of British Geographers, 2004,29(1):106-128.
- [3] 刘逸文,熊礼阳,方炫.黄土地貌地形特征点格局研究[J]. 地理与地理信息科学,2017,33(5):35-41. [Liu Y W, Xiong L Y, Fang X. Pattern analysis of terrain feature points of Loess Topography[J]. Geography and Geo-Information Science, 2017,33(5):35-41.]
- [4] Toriwaki J, Fukumura T. Extraction of structural information from grey picture[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1978,7(1):30-51.
- [5] Wood J. The geomorphological characterization of digital elevation models[D]. Lancaster: University of Lancaster, 1996.
- [6] Lee J, Fisher P F, Snyder P K. Modeling the effect of data errors on feature extraction from digital elevation models [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992,58:1461-1461.
- [7] Bolongaro-Crevenna A, Torres-Rodriguez V, Sorani V, et al. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico[J]. Geomorphology, 2005,67(3-4):407-422.
- [8] 钟业勋,魏文展,李占元.基本地貌形态数学定义的研究[J].测绘科学,2002(3):16-18,2. [Zhong Y X, Wei W Z, Li Z Y. A Research on the mathematical definition of the basic landform shape[J]. Science of Surveying and Mapping, 2002(3):16-18,2.]
- [9] 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.]
- [10] 黄培之,陈凯辉,刘泽慧.基于共轭地表曲面的山脊线和山谷线提取方法的研究[J].测绘科学,2004(5):25-27,3. [Huang P Z, Chen K H, Liu Z H. Extraction of ridge and valley from DEM based on conjugate terrain[J]. Science of Surveying and Mapping, 2004(5):25-27,3.]
- [11] 熊礼阳,汤国安,宴实江.基于DEM的山地鞍部点分级提取方法研究[J].测绘科学,2013,38(2):181-183. [Xiong L Y, Tang G A, Yan S J. Grading extraction method of saddles based on DEM[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013,38(2):181-183.]
- [12] 闫国年,钱亚东,陈钟明.流域地形自动分割研究[J].遥感学报,1998,11(4):298-304. [Lü G N, Qian Y D, Chen Z M. Study of automated topography partition of watersheds [J]. Journal of Remote Sensing, 1998,11(4):298-304.]
- [13] 张维,汤国安,陶旻,等.基于DEM汇流模拟的鞍部点提取改进方法[J].测绘科学,2011,36(1):158-159,163. [Zhang W, Tang G A, Tao Y, et al. An improved method to saddles extraction based on runoff concentration simulation in DEM[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011,36(1):158-159,163.]
- [14] 朱庆,赵杰,钟正,等.基于规则格网DEM的地形特征提取算法[J].测绘学报,2004,33(1):77-82. [Zhu Q, Zhao J, Zhong Z, et al. The extraction of topographic patterns based on regular grid DEMs[J]. Science of Surveying and Mapping, 2004,33(1):77-82.]
- [15] Yang X W, Tang G A, Meng X, et al. Saddle position-based method for extraction of depressions in Fengcong areas by using digital elevation models[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2018,7(4):136.
- [16] 乔朝飞,赵仁亮,陈军.等高线空间关系研究[J].测绘与空间地理信息,2004(5):77-81. [Qiao C F, Zhao R L, Chen J. Study of the spatial relations of topographic contour lines[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2004(5):77-81.]
- [17] 朱强,武芳,钱海忠,等.基于空间认知的等高线树的构建[J].信息工程大学学报,2011,12(4):458-462. [Zhu Q, Wu F, Qian H Z, et al. Spatial cognition oriented contour-tree building[J]. Journal of Information Engineering University, 2011,12(4):458-462.]
- [18] Wu Q S, Liu H X, Wang S J, et al. A localized contour tree method for deriving geometric and topological properties of complex surface depressions based on high-resolution topographical data[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2015,29(12):2041-2060.
- [19] 张威.基于等高线簇的等高线树构建方法研究[J].科学技术创新,2017(22):69-70. [Zhang W. Research on contour tree construction method based on contour cluster[J]. Scientific and Technological Innovation, 2017(22):69-70.]
- [20] Wu B, Yu B L, Wu Q S, et al. Individual tree crown delineation using localized contour tree method and airborne

- LiDAR data in coniferous forests[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2016, 100(52):82-94.
- [21] 吴凡,粟卫民.顾及地形特征的等高线拓扑空间关系表达[J].武汉大学学报·工学版,2006,39(3):140-144. [Wu F, Su W M. Representation of topological spatial relations between contour lines based on terrain features[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006,39(3):140-144.]
- [22] 孔月萍,易炜,张跃鹏.利用拓扑关系快速提取鞍部点[J].计算机工程与应用,2013,49(16):165-167. [Kong Y P, Yi W, Zhang Y P. Extracting saddle point fast based on topological relationship[J]. Computer Engineering and Applications,2013,49(16):165-167.]
- [23] 郭庆胜,毋河海,李沛川.等高线的空间关系规则和渐进式图形简化方法[J].武汉测绘科技大学学报,2000,25(1):31-34. [Guo Q S, Wu H H, Li P C. Spatial relation rules and progressive graphic simplification of contours[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000,25(1):31-34.]
- [24] 彭云龙,王婕婷,赵志军.基于DEM的庐山地区水系的提取方法与应用探究[J].地理教学,2016(18):57-59. [Peng Y L, Wang J T, Zhao Z J. Research on extraction method and application of water system in Lushan area based on DEM[J]. Geography Teaching, 2016(18):57-59.]
- [25] 赵远洋,黄平,战一波.基于提高Arc Hydro的水文分析精度的研究进展[J].山东工业技术,2016(14):214. [Zhao Y Y, Huang P, Zhan Y B. Research progress based on improving the accuracy of hydrology analysis of Arc Hydro [J]. Shandong Industrial Technology, 2016(14):214.]
- [26] 吴婕,董有福,彭瑾,等.基于DEM的山顶点和鞍部点一体化提取[J].测绘地理信息,2018,43(5):85-88. [Wu J, Dong Y F, Peng J, et al. Integrated extraction of surface peaks and saddles based on DEM[J]. Journal of Geomatics, 2018,43(5):85-88.]