引文格式:赵彬彬,谢建湘,张宏奎,等.运用Morphing变换提取地性线算法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(1):174-183.DOI:10.13203/j.whugis20220493

Citation: ZHAO Binbin, XIE Jianxiang, ZHANG Hongkui, et al. Geographic Line Extraction Algorithm Based on Morphing Transformation Techniques[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(1): 174-183. DOI: 10.13203/j.whugis20220493

运用Morphing变换提取地性线算法研究

赵彬彬[1,2] 谢建湘[1] 张宏奎[1] 王笠苇[1] 王 倩[1]

1 长沙理工大学交通运输工程学院,湖南 长沙,410114

2 长沙理工大学公路地质灾变预警空间信息技术湖南省工程实验室,湖南 长沙,410114

摘 要:由等高线获取山谷(脊)线对地形分析、坡度坡向计算和库区设计等应用具有重要的现实意义和非常高的生产价值。当前,面向等高线的地性线提取大多采用特征点连接法,其提取的地性线易与等高线发生空间逻辑冲突,在等高线弯曲形状较多变、较复杂的区域,所获取的山谷(脊)线存在与等高线弯曲特征不符且偏离较严重等问题。因此,依据地理学第一定律分析了等高线整体形态及局部形状特征,基于Morphing变换技术,提出了一种兼顾地性线两侧等高线形状特征,同时顾及山谷(脊)特征点位置约束的地性线提取新方法。首先,凭借各等高线的高程及其层次关系构建等高线树,并根据等高线上节点凹凸属性进行等高线弯曲分割,以高效准确地提取地形特征点;然后,以地形特征点为界构建其两侧等高线各节点之间的极优映射关系;最后,以地形特征点为约束,采用基于渐变移位距离值的Morphing变换提取地性线。实验结果表明,该方法能准确地提取出完整的与实际地形相吻合亦兼顾等高线整体形态与走势的地性线。

关键词:地理学第一定律;等高线树;地形特征点;地性线;Morphing变换

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-02-10

DOI:10.13203/j.whugis20220493 **文章编号**:1671-8860(2025)01-0174-10

Geographic Line Extraction Algorithm Based on Morphing Transformation Techniques

ZHAO Binbin[1,2] *XIE Jianxiang*[1] *ZHANG Hongkui*[1] *WANG Liwei*[1] *WANG Qian*[1]

1 School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

2 Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of Highway Geological Disaster Early Warning in Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

Abstract: **Objectives**: Obtaining valley (ridge) lines from contour data has important practical significance and high production value for terrain analysis, slope aspect calculation and reservoir area designing. In view of the fact that current contour-oriented geographic lines extraction mostly adopts feature point direct-connecting method, and the extracted geographic lines are prone to spatial logical conflicts with contour lines. Meantime, in areas where the contour lines are more curved and more complex, the extracted valley (ridge) line does not conform to the bending characteristics of contour lines, and even deviates dramatically in certain local areas. **Methods**: Therefore, after overall shape and local shape characteristics of the contour line are analyzed sufficiently based on Tobler's first law, a novel methodology of extracting geographic lines from contour data based on Morphing transformation techniques is proposed, which takes the contour line on both sides of a valley (ridge) into consideration, as well as constraint of feature points' location. First, a contour tree is constructed based on the elevation and hierarchical relationship of contours, and the contour curve segmentation is carried out according to the concave and convex attributes of nodes on the con-

基金项目:国家自然科学基金(41301404);长沙理工大学公路地质灾变预警空间信息技术湖南省工程实验室开放基金(kfj160603);2021年长沙理工大学学术学位研究生科研创新项目(CX2021SS106)。

第一作者:赵彬彬,博士,副教授,主要从事地理数据不一致性探测处理的理论与方法等研究。zbbsir@163.com

通信作者:谢建湘,硕士,工程师。15111425585@163.com

tour line. Then, the terrain feature points are extracted efficiently and accurately. Second, each contour line is split into two parts with the terrain feature points, whereafter, an optimal correspondence of the nodes on both parts of a contour line are computed. Third, with respect to the constraints of terrain feature points, the geographic lines are extracted by performing Morphing transformation with a gradient shifting distance value. **Results:** The experimental results show that the methodology extracts complete geographic lines accurately, which are consistent with the actual terrain and take into account the overall shape and trend of contour lines. **Conclusions:** The geographic lines extraction based on Morphing transformation techniques method can take into account the overall shape and trend of contour lines and unique shape at feature points to extract complete geographic lines consistent with the actual terrain, and it is robust. When the local terrain changes are complex, the contour shape is also complex. At this time, the allocation of Morphing transformation value for parameter t considering more factors will be involved, which is also the content to be further studied in the follow-up work.

Key words: the first law of geography; contour tree; topographic feature points; geographic lines; Morphing transformation

自然地理环境中地形变化多端、极其复杂。穷源溯流,看似复杂的地形均可由点、线、面3种基本地图要素来表达,而经由大自然长期影响所形成的地性线是其中最重要的地形特征线,亦是地形地貌的骨架线,对地形的基本形态与整体走势起着决定性作用,在地形表达、库区规划、水文分析和可视域提取等工程应用领域有着不言而喻的重要意义[1-2]。

目前,从数据源类型来看,地性线提取方法可概括为面向数字高程模型(digital elevation model,DEM)的地性线提取和面向等高线的地性线提取两大类。以DEM为数据源的地性线提取中,基于规则格网的提取方法占主导地位[3],从原理上可分为基于图像处理技术[4]和基于地表流水物理模拟[5-6]的算法。而面向等高线的地性线提取在实用性与精度上具有更大优势[7],成果丰硕,主要包括等高线曲率判别法、等高线骨架化法[8]、基于Delaunay三角网法[9-10]、Split算法[11]和基于均值漂移的方法[12]等,这些方法大多采用特征点连接法生成地性线[7]。特征点连接法算法简单,在一定尺度下适用。一般而言,其生成的地性线较为准确亦相对完整,但易与等高线发生空间逻辑冲突。例如,在水系和等高线要素的集成中,特征点连接法提取的山谷线往往与真实山谷线偏离较远,这将影响水系与等高线间的不一致性探测与处理[13]。近年来,已有学者根据地性线两侧等高线特征来确定两特征点间地性线的具体形态以提取地性线[14]。

研究等高线形状特征不难发现,其在山谷、山脊点处的局部形态一般表现为U、V字形,且以山谷点或山脊点为界的两侧等高线近似对称于地性线[15],亦即地性线到两侧等高线对应位置的距离近似相等。这亦是地理学第一定律"一切事物都与其他事物相关,但近处的事物比远处的事物相关性更强"[16]的直观体现,Tobler认为地表万事万物在空间上都存在关联,关联的强弱随距离减小而增强。这种关联关系表现为空间实体相互作用、相互影响,形成特定结构的分布模式[13,16],山谷和山脊的形成与其两侧地形的相互作用和影响直接相关。为了更准确地提取出与等高线之间空间逻辑一致性更高,且与实际地形更吻合的地性线,本文提出了一种基于Morphing变换的地性线提取新方法(geographic lines extraction based on Morphing transformation techniques,GLEM)(见图1)。对于每根等高线,首先利用圆拟合法参考形状指数与转角提取地性点,继而以特征点为界将等高线分为两段并进行Morphing变换,从而提取出顾及等高线形态特征的地性线。

1　等高线树构建与弯曲分割

等高线以类似凹、凸包的形式表达地形的起伏变化,而地性线往往隐含于等高线。因此,分割等高线的凹凸弯曲能建立等高线几何形状与山谷、山脊点之间的关系,亦便于确定山谷、山脊点的提取范围,而各弯曲凹凸属性的确定以及分割都需要借助各等高线的高程信息及各等高线之间的位置关系。等高线树能合理且有效地表达各等高线之间的空间关系[9,17]。如图2所示,根据图2(a)中各等高线的高程与位置关系可建立对应的等高线树(图2(b))。利用等高线树层次

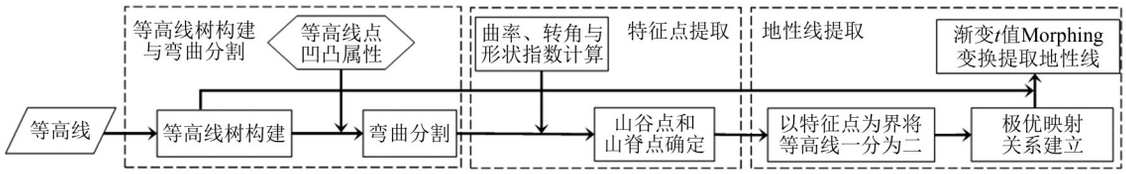
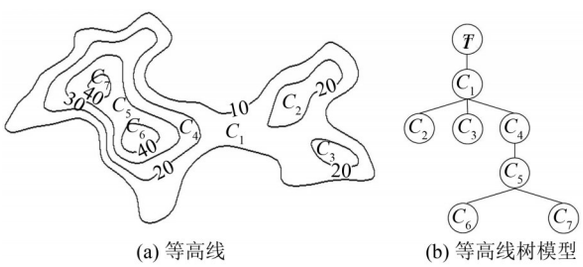


图1 基于Morphing变换的地性线提取流程

Fig. 1 Geographic Lines Extraction Strategy Based on Morphing Transformation Techniques

结构有利于随后各弯曲凹凸属性的确定与分割，从而确定各山谷、山脊点的提取范围，同时根据各弯曲凹凸属性能合理区分山谷点与山脊点。



(a) 等高线 (b) 等高线树模型

图2 等高线及其等高线树模型

Fig. 2 Contour Line and Its Corresponding Contour Tree

为了准确地获取山谷(脊)点等地形特征点，需根据等高线各节点的凹凸属性进行弯曲分割，如图3所示。

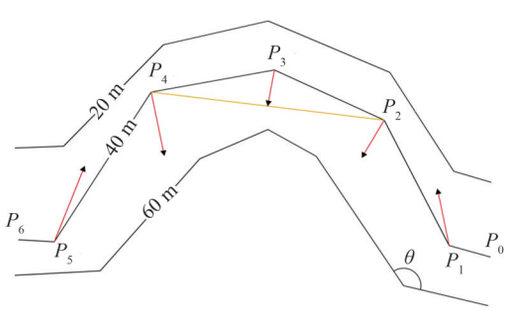


图3 等高线弯曲分割

Fig. 3 Segmentation of Contour Curves

首先，对等高线进行预处理，使每条等高线坐标串前进方向保持一致，本文规定坐标串前进方向的左侧为高程值增大方向。以待判断点(如图3中P_3)为起点，待判断点前后两点连线的中点为终点，可视为一向量，若向量在坐标串前进方向的左侧，说明该点与前后两点所组成的等高线段向高程减小、方向凸出，即该点的凹凸属性为凹；反之，若向量在坐标串前进方向的右侧，说明该点与前后两点所组成的等高线段向高程增大、方向凸出，即该点的凹凸属性为凸。

其次，依据等高线坐标串前进方向的设定规则以及山谷和山脊的属性可知，属性为凸的点为山谷范围内的点，属性为凹的点为山脊范围内的点。

然后，合并凹凸属性相同的点组成凹凸弯曲，各弯曲分界点为凹凸属性突变的两点的中点。当等高线存在抖动时，即若某点凹凸属性与其两侧相邻弯曲凹凸属性均不同[12,18]，则考察该点与其前后相邻两节点连线之间的夹角θ(见图3)。若θ大于设定阈值120°[18]，则该点为两弯曲分界点；若θ小于设定阈值120°，则该点为其两侧相邻弯曲之间的小抖动，并合并两弯曲。根据图1所示的地性线提取策略，等高线弯曲分割之后即可提取山谷点与山脊点。

2 山谷点与山脊点提取

山谷点和山脊点即地性线与等高线的交点。以§1中分割的弯曲部分为特征点候选点集区域，采用弯曲内各节点的曲率、转角以及形状指数作为特征点选取的3项指标。

2.1 指标计算方法

等高线节点的曲率是衡量等高线在该点处弯曲程度的重要指标，其计算方法众多。圆拟合法是其中较为简单亦有效的一种[19]，用曲线上3个相邻节点对曲率圆进行拟合，中间节点处等高线的曲率即为曲率圆半径的倒数。

如图4所示，等高线C_2上不在一条直线上的3个相邻节点P_3、P_4、P_5可确定一个圆亦即三角形$P_3P_4P_5$的外接圆，节点P_4处等高线的曲率为此圆半径的倒数。

根据正弦定理：

$$\frac{c}{\sin\angle P_3P_4P_5}=2r \tag{1}$$

三角形面积计算公式：

$$S=\frac{1}{2}ab\times\sin\angle P_3P_4P_5 \tag{2}$$

海伦公式：

$$\begin{cases}S=\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}\\ p=\dfrac{1}{2}(a+b+c)\end{cases} \tag{3}$$

可推导出曲率表达式：

$$k=\frac{1}{r}=\frac{1}{abc}\left[(a+b+c)(a+b-c)\cdot(a+c-b)(b+c-a)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中,S表示三角形$P_3P_4P_5$的面积;p为三角形$P_3P_4P_5$的半周长;k表示节点P_4处等高线的曲率,单位为rad/m;r为三角形$P_3P_4P_5$的外接圆的半径;a、b和c分别为线段P_3P_4、P_4P_5以及P_3P_5的长度。

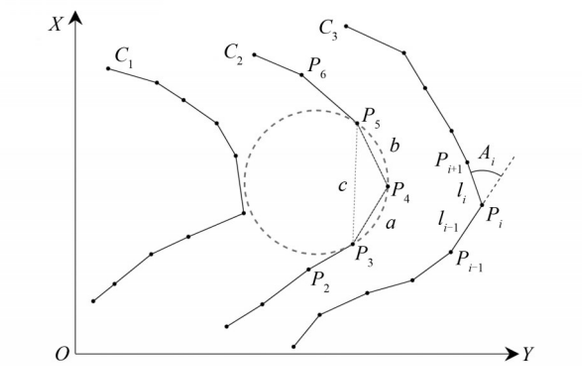


图4　特征点提取

Fig. 4　Extraction of Feature Points

通常地,转角能反映等高线形状变化大小,节点转角变化越大说明等高线的形状特征变化越大。如图4所示,等高线C_3在节点P_i处的转角A_i的计算公式为:

$$A_i=\arccos\frac{P_{i-1}P_i\cdot P_iP_{i+1}}{|P_{i-1}P_i|\times|P_iP_{i+1}|} \tag{5}$$

形状指数可以反映两线段共有点的重要性程度,节点形状指数越大说明该点对等高线的形状特征贡献越大。如图4所示,节点P_i处的形状指数J_i的计算公式为:

$$J_i(l_{i-1},l_i)=\frac{A_i\times L_{i-1}\times L_i}{L_{i-1}+L_i} \tag{6}$$

式中,L_{i-1}与L_i分别表示与节点P_i相邻的两直线段l_{i-1}与l_i的长度。

2.2　山谷点与山脊点提取

为了提取完整详细的地性线,需要在每个凹凸弯曲内均选取一个地性点。依次计算弯曲内各点处的曲率、转角和形状指数。选择3项指标中至少有两项比其他节点大的点为特征点(即若某点的曲率以及转角都比弯曲内其他节点的大,则该点为特征点),若无节点满足上述条件,则于弯曲内采用垂距限差法进行辅助判断,以此保证每个弯曲部分都能提取出特征点[20]。对于某些可能存在地性线分岔的弯曲部分,则根据弯曲底边长提取两个特征点(两特征点间的直线距离大于弯曲底边长的一半)。

3　地性线的提取

3.1　地性线提取策略

由地理学第一定律与等高线形状特征可知,一定程度上,地性线同时具有分界点两侧等高线的特性。为了使地性线更符合实际地形特征,采用Morphing变换进行地性线提取。Morphing变换过程能同时兼顾参与变换各对象的形状等特征,最早应用于计算机图像处理领域[21],源于其思想与地图连续综合相似,遂被引入制图综合[22-25]、不一致性处理等领域[26-27]。

对于每根等高线,在提取出山谷、山脊点之后,以山谷点或山脊点为界将等高线一分为二,如图5所示,将山谷点或山脊点一侧的等高线记为起始目标A,另一侧的等高线记为终止目标B。利用OptCor算法确定两目标线段上各节点间的整体极优映射关系[22],继而以映射点之间的直线为移位路径进行Morphing变换,得出顾及等高线整体形态与走势的地性线。其中,由移位距离值$t\left(t\in[0,1]\right)$控制Morphing变换插值结果的位置与形状[27]。当t趋近0时,则Morphing变换插值结果的位置、形状等特征亦趋近起始目标A;当t趋近1时,则Morphing变换插值结果的位置、形状特征亦趋近终止目标B。当$t=0$时,Morphing变换插值结果即为起始目标A;当$t=1$时,Morphing变换插值结果为终止目标B。图5中由上至下虚线、粗实线及点划线为移位距离值t分别取固定值0.2、0.5和0.8时的Morphing插值结果。

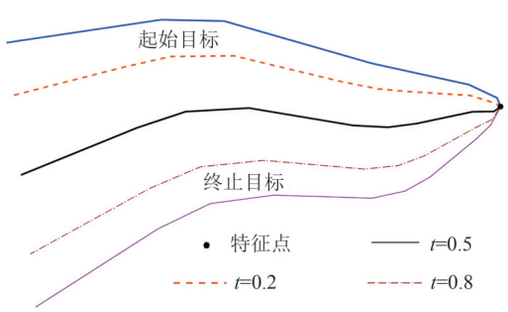


图5　等高线Morphing变换过程

Fig. 5　Contour Morphing Transformation Process

3.2　极优映射关系的建立

本文以起始目标与终止目标上各映射点的连线作为Morphing变换的移位路径,因此两目标上各节点间映射关系的建立直接影响Morphing变换结果。为了兼顾等高线整体形态与走势,本文通过整体极优映射算法来确立两目标上各节点、子线段和折线段间的映射关系[22,27]。从起始

目标上由相邻两节点组成的子线段出发,存在3种可能的映射情况:(1)(M_1)子线段与终止目标上单个节点映射(如图6中的Ⅰ);(2)(M_2)子线段与终止目标上单个子线段映射(如图6中的Ⅱ);(3)(M_3)子线段与终止目标上单个折线段映射(如图6中的Ⅲ)。

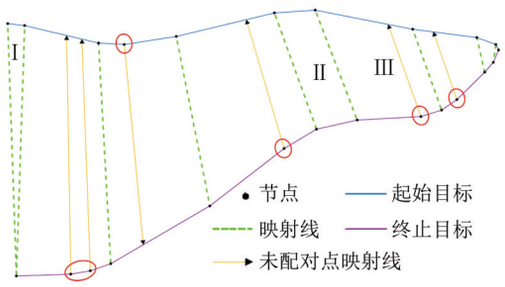


图6 极优映射的建立过程

Fig. 6 The Process of Establishing Optimum Mapping

同理,从终止目标上由相邻两节点组成的子线段出发,亦存在上述3种可能的映射关系。如图6所示,当子线段映射折线段时,对于未建立映射关系的各红圈处节点,通过线性插值计算其在子线段上的映射点[27]。

针对两目标间每一种映射关系,采用T指标值[22]作为距离评价指标。首先将各映射线两端点中位于起始目标上的定为起点,位于终止目标上的定为终点,继而平移各映射线使各起点位于同一点,终点按顺序依次相连所形成新折线的长度即为T指标值。在选取适当的回溯步长K值后,使T指标值达到最小的映射关系即为此步长范围下的最佳映射,最后得到两目标间的极优映射关系。为了利于随后的地性线提取,需根据线性插值以及向量共线的原理求出通过相邻等高线(由§1中等高线树获得)特征点的映射线。如图7所示,设过相邻等高线上地形特征点P_5的映射线为P_6P_7,则P_1P_6在P_1P_2中所占比例应与P_3P_7在P_3P_4中所占比例相等,并且向量P_6P_5应平行于向量P_5P_7,即P_6与P_7两点的坐标可建立一元二次方程求出,计算公式为:

$$\begin{cases}\dfrac{P_1P_6}{P_1P_2}=\dfrac{P_3P_7}{P_3P_4}\\ P_6P_5\times P_5P_7=0\end{cases}\tag{7}$$

同时,为使地性线连续,只需保留自身特征点至相邻等高线特征点间的映射线。

3.3 渐变t值Morphing变换

对于每根等高线而言,建立以特征点为界的两等高线目标间的极优映射关系后,以不同的$t\left(t\in[0,1]\right)$值进行内插可生成介于两目标间的

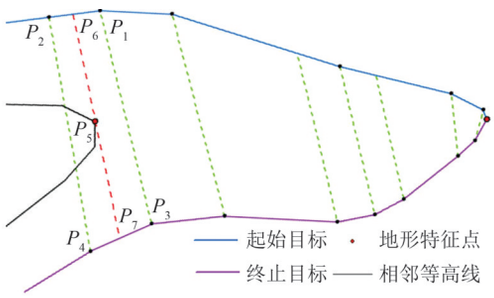


图7 特征点处映射线计算

Fig. 7 Calculation of the Mapping Line at the Feature Point

中间对象序列。而地性线到两侧等高线相对位置的距离近似相等,且地性线与以特征点为界的两侧等高线的关联程度近似相等,因此,当t取值0.5时即可生成山谷、山脊线。但是由等高线的形状特征可知,在地形图上相邻等高线形状的相似性随等高距的增加而减弱,随等高距的减小而增强[28],相邻等高线形态并不完全相似。因此,由t取值0.5所生成的地性线不一定通过相邻等高线的地形特征点。如图8所示,等高线C_5上特征点P_{FC5}处Morphing变换的t取值为0.5,由该固定t值提取的地性线为图8中的灰色虚线,而该地性线并不通过相邻等高线C_4的特征点P_{FC4},这有悖于地性线的特性,即不满足山谷(脊)特征点位置约束。因此,采用渐变t值Morphing变换来提取地性线,具体思路为:获得等高线C_5上两目标各节点间的映射关系后,首先,令待Morphing变换的等高线C_5上特征点P_{FC5}处的移位值t取0.5;然后,获取相邻等高线C_4上特征点P_{FC4}到其所在映射线P_iP_j两端点的距离;进而,计算求得特征点P_{FC4}到端点P_i的距离与映射线P_iP_j长度之比值为0.42,亦即等高线C_4上特征点P_{FC4}处的移位值t取0.42;最后,中间各节点Morphing变换的t值则根据两初始t值之差与中间映射线的数量进行平均分配。如图8所示,等高线C_4和C_5上各自特征点P_{FC4}和P_{FC5}处两初始t值分别为0.42与0.5,而中间映射线(即图8中绿色虚线)数量为7,则中间各节点Morphing变换的t值分别为0.43、0.44、0.45、0.46、0.47、0.48与0.49。由渐变t值Morphing变换可生成兼顾等高线整体形态与走势并满足山谷(脊)特征点位置约束的地性线,即图8中红色实线。

3.4 渐变t值Morphing变换提取地性线

地性线提取流程如图9所示,依据§1中构建的等高线树,从各等高线组的叶节点亦即高程最高的等高线开始提取山谷线,从各等高线组的根

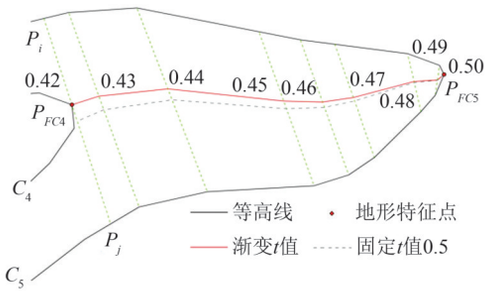


图 8　渐变 t 值分配

Fig. 8　Calculation of a Gradient t Value

节点亦即高程最低的等高线开始提取山脊线。

以一等高线组中山谷线的提取为例说明运用本文方法获取地性线的步骤：

1）以叶节点首个山谷弯曲中山谷点为起点 V_1（如图 10 中节点 P_1）。

2）寻找 V_1 所在节点的上一节点中与 V_1 构成连接关系的山谷点 V_2，其中，V_2 的选取遵循距离原则、角度原则和不跨越原则[9-10]。（1）距离原则：取距离当前特征点最近的待匹配特征点为目标特征点；（2）角度原则：等高线在当前特征点与待匹配特征点处的张角方向应基本相同；（3）不跨越原则：当前特征点与待判断特征点之间的地性线不能跨越等高线与已有地性线。具体地，先考虑距离原则，找出距离当前特征点最近的待匹配特征点，进而对该点与当前特征点考察角度原则与不跨越原则，若满足角度原则与不跨越原则，则该点为目标特征点，若该点与当前特征点不满足角度原则或不跨越原则，则从待匹配点集中移除该点。同时在河流流经的河谷区域，可以采用河流进行辅助判断，减少计算量。

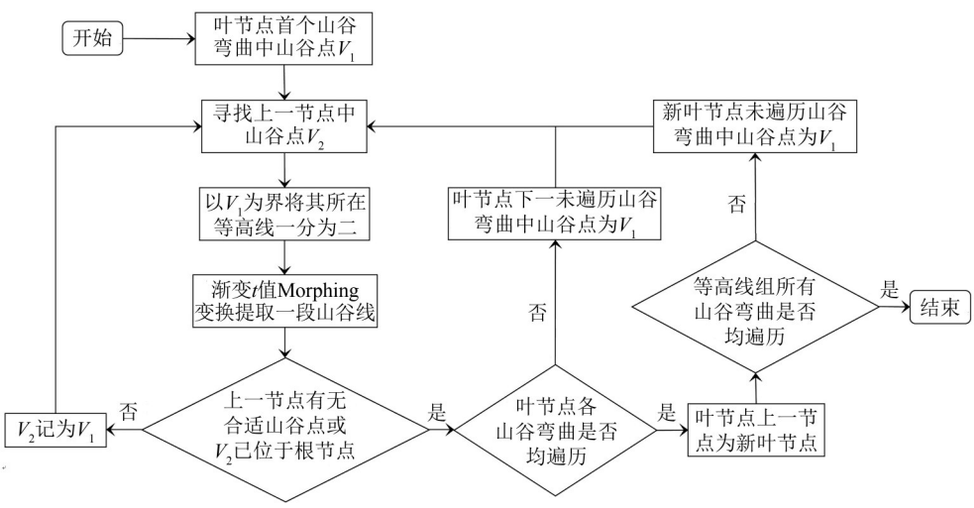


图 9　地性线提取流程图

Fig. 9　Flowchart of Extracting Geographic Lines

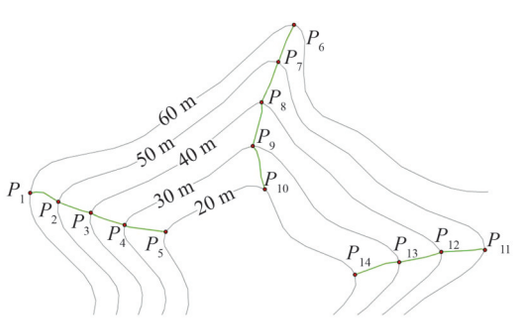


图 10　Morphing 变换提取地性线

Fig. 10　Morphing Transformation Based Geographic Lines Extraction

3）以 V_1 为界将等高线分为两目标，本文统一规定等高线坐标串前进方向的后侧为起始目标 A，前侧为终止目标 B，建立两目标各点间的映射关系并求出经过 V_2 的映射线，对经过 V_1 与 V_2 的映射线间的两目标进行渐变 t 值 Morphing 变换提取山谷线。

4）以 V_2 为起始山谷点 V_1，重复步骤 2）和步骤 3），直至上一节点中无合适的山谷点或 V_2 已位于根节点（如图 10 中 P_5 已位于根节点）。

5）以叶节点中下一个未遍历山谷弯曲中的山谷点为起点 V_1（如图 10 中节点 P_6），重复步骤 2）～4），直至遍历叶节点中所有山谷弯曲，以叶节点上一节点为新的叶节点（如图 10 中高程为 50 m 的等高线）。

6）以新叶节点未遍历山谷弯曲中的山谷点为起点 V_1（如图 10 中节点 P_{11}）重复步骤 2）～5），直至遍历该等高线组中所有山谷弯曲。

在以上步骤中，若 V_1 所在节点的上一节点中与其相邻的山谷弯曲已遍历，则根据角度阈值连接 V_1 与已遍历弯曲中的山谷点，一般为两山谷线汇合处。山脊线提取步骤与山谷线类似。

4 地性线提取实验分析

实验区位于中国湖北省某山地丘陵地区,包括等高线数据与河流数据,其中等高线由5 662个点组成,最大高程为510 m,最小高程为180 m,等高距为10 m,河流数据比例尺为1∶5万。通过与特征点连接法提取的地性线进行对比分析来验证本文方法的合理性,二者均采用本文特征点提取方法进行特征点提取,之后引入该区域的河流数据来评价本文方法的准确性与稳健性。

利用本文方法提取的山谷点、山脊点如图11所示。由图11可知,本文方法能提取出完整的地形特征点,且能很好地对山谷点与山脊点进行区分。对等高线进行弯曲分割确定地形特征点的候选点集,弥补了等高线曲率判别法仅从局部考虑的不足,可以避免等高线形状变化较为平缓的弯曲部分出现特征点遗漏现象,同时利用圆拟合法计算等高线点曲率结合点的形状指数与转角于候选点集中确定地形特征点,防止在等高线形状变化较为复杂的弯曲部分提取多余的特征点,利于随后地性线提取中t值的确定。

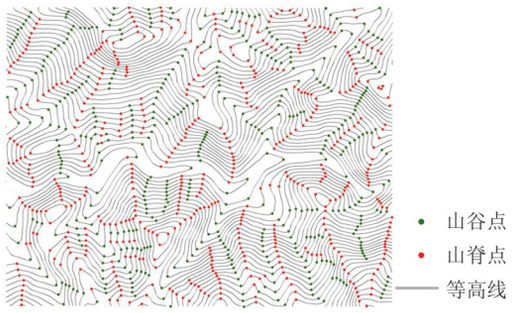


图11 特征点提取结果

Fig. 11 Extraction Results of Feature Points

对该区域进行地性线提取,特征点连接法与本文方法提取的地性线结果如图12所示。不难看出,这两种方法都能提取出较为完整的地性线,与人工判读的结果基本相符,且在等高线形态变化较为规律的区域,二者提取结果基本一致。但在等高线形状变化较大的位置(如图12中红色框区域),特征点连线法提取结果不太理想,其与等高线的弯曲特征不符且偏离严重,而本文方法则很好地顾及了等高线整体形态与走势,提取的地性线点的密度更高,其走势亦符合两侧等高线的形态规律。

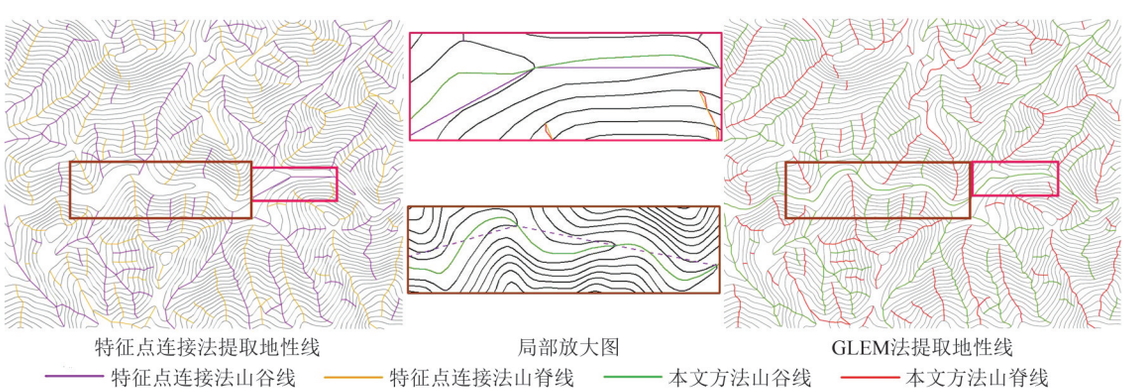


图12 特征点连线法和GLEM法提取地性线结果分析

Fig. 12 Analysis of Extracted Geographic Lines Based on Feature Points and the Proposed Method Respectively

由图12中棕色框区域可知,特征点连接法在某些等高线形状变化更为复杂的河谷区域已不适用,其提取的山谷线与等高线多次相交,明显违背现实世界自然规律,而本文方法在这些区域能提取出连续且较光滑的山谷线,亦兼顾了山谷两侧等高线的形态特征。

由于等高线与河流在获取途径、数据来源及更新周期等方面不尽相同,二者可能会发生不一致性现象,常表现为河流沿着高程减小的方向偏移一段距离,但是其形状会与山谷线大致相同[29]。特别地,在特征点连接法所不适用的等高线形状变化复杂的河谷区域,如图13中河流流经区域,本文方法表现稳健,其提取的山谷线在整体走势和形状上与河流更接近,符合自然规律,表明本文方法提取的地性线与实际地形吻合程度更高。

同时,为验证本文方法地性线提取的精确性,采用中国安徽省谷底特征较明显、河流较丰富的某地区与多准则法[14]进行对比分析,同样地,实验区包含等高线与河流两种数据,其中等高线最大高程为540 m,最小高程为270 m,等高距为10 m,河流比例尺为1∶5万。运用多准则法提取的地性线结果如图14所示。该方法能提取出完整的地性线且大体符合等高线的形态特

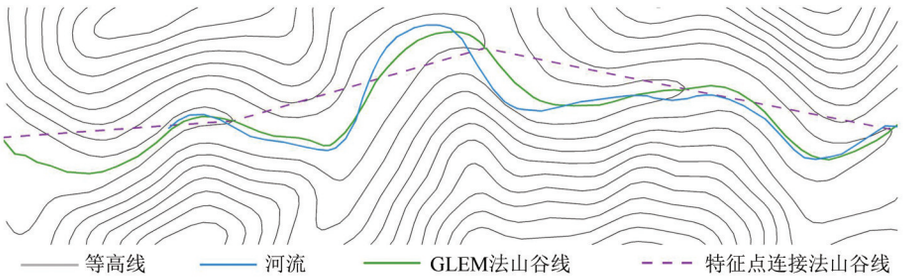


图 13　实验区河流与山谷线

Fig. 13　River and Valley Lines in the Study Area

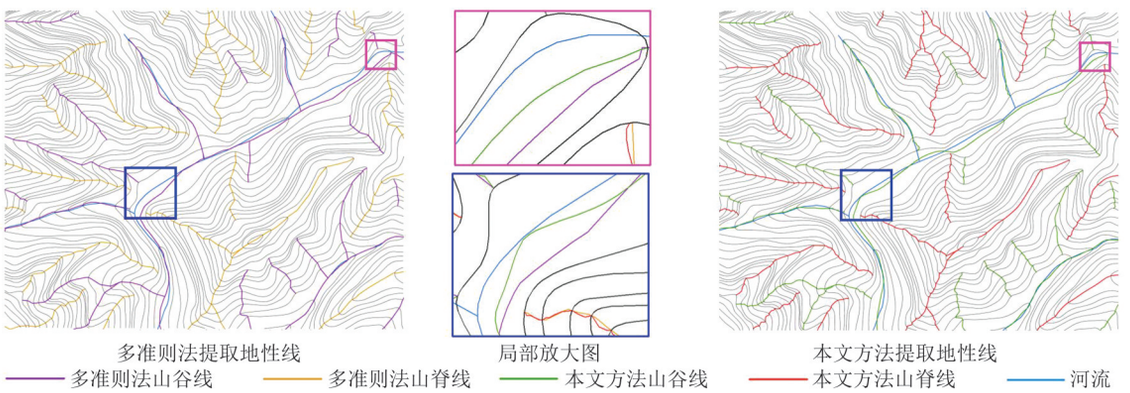


图 14　多准则法提取地性线结果分析

Fig. 14　Analysis of Extracted Geographic Lines Based on Multi-criterion Method

征,但在等高线形态多变处,本文方法兼顾两侧等高线形态变化特征提取的地性线表现更为优良,能较好地体现等高线形态变化及突变趋势。

在河流流经区域,通过计算与河流的平均路径差(average route difference, ARD)来评估这两种方法所提取的地性线[14]。其计算公式为:

$$D_{\mathrm{ARD}}=\frac{\sum S_{P_m}}{\sum_{i=1}^{n} L_i} \tag{8}$$

式中,D_{ARD}为平均路径差;$\sum S_{P_m}$为河流与山谷线所围各多边形的总面积;n为河流总数量;L_i为河流长度。

经计算得本文方法与多准则法提取地性线与河流的ARD分别为5.41 m与6.05 m,结果表明本文方法提取的地性线精度更高。

由等高距为10 m的等高线数据实验可知,针对狭长的山谷山脊地形(如大多数河谷区域),即在等高线自弯曲形成范围较大、等高线形状变化较复杂的区域,本文方法优势明显,其能有效避免地性线与等高线之间的空间逻辑冲突,这对水系要素与等高线要素的高质量集成具有重要意义。本文采用渐变移位值Morphing变换提取地性线,对每一根等高线而言,当自身特征点与相邻等高线特征点处的t值确定后,中间各节点处的t值也随之确定,即每段地性线Morphing变换的t值是动态渐变的。

5　结　语

山谷线与山脊线是地形特征线的重要组成部分,针对当前面向等高线的地性线提取大多采用的特征点连接法易导致次生冲突等问题,本文以地理学第一定律为指导思想,基于Morphing变换提出了一种地性线提取新方法。通过对中国两个不同地形区域1∶5万等高线进行实验,结果表明本文方法能准确地提取出完整的、与实际地形相吻合的,同时与等高线间空间逻辑一致性更强的地性线,且表现稳健。亦应看到,当局部地形变化复杂时,其等高线形态亦较复杂,此时将涉及考虑更多因素的Morphing变换t值的分配;本文方法地性线提取结果的精度主要取决于极优映射关系构建时的回溯步长K值,而确定不同地形或复杂度不同的等高线所对应的最合适的K值是一个比较复杂的问题,需要通过大量的实验来进行有效分析。这也是后续工作有待深入研究的内容。

参　考　文　献

[1]　LI M, WU T, LI W T, et al. Terrain Skeleton

Construction and Analysis in Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(2): 136.

[2] 米晓新, 杨必胜, 董震. 车载激光点云道路场景可视域快速计算与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(2): 258-264.
MI Xiaoxin, YANG Bisheng, DONG Zhen. Fast Visibility Analysis and Application in Road Environment with Mobile Laser Scanning Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(2): 258-264.

[3] 邹昆, 沃焱, 徐翔. 利用特征显著度提取地形特征线的方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(3): 342-348.
ZOU Kun, WO Yan, XU Xiang. A Feature Significance-Based Method to Extract Terrain Feature Lines[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(3): 342-348.

[4] 孔月萍, 方莉, 江永林, 等. 提取地形特征线的形态学新方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(8): 996-999.
KONG Yueping, FANG Li, JIANG Yonglin, et al. A New Method of Extracting Terrain Feature Lines by Morphology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 996-999.

[5] 黄炅怡, 黄培之, 李坚强. 利用流水矢量提取山脊线和山谷线特征点的方法[J]. 测绘通报, 2020(10): 12-15.
HUANG Jiongyi, HUANG Peizhi, LI Jianqiang. Feature Point Extraction of Ridge Line and Valley Line from DEM Based on Falling Vector[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(10): 12-15.

[6] 王洪斌, 赵学胜, 张春亢, 等. 一种基于Morse复形的地形特征线构建改进算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(9): 1220-1224.
WANG Hongbin, ZHAO Xuesheng, ZHANG Chunkang, et al. An Improved Algorithm of Constructing Terrain Feature Lines Based on Morse Complex[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(9): 1220-1224.

[7] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305-1325.
TANG Guoan. Progress of DEM and Digital Terrain Analysis in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1305-1325.

[8] OLIVEIRA W A A , GULIATO D, DE OLIVEIRA D C B, et al. New Technique for Binary Morphological Shape-Based Interpolation[J]. *International Journal of Image and Graphics*, 2019, 19(2): 1950007.

[9] 艾廷华, 祝国瑞, 张根寿. 基于Delaunay三角网模型的等高线地形特征提取及谷地树结构化组织[J]. 遥感学报, 2003, 7(4): 292-298.
AI Tinghua, ZHU Guorui, ZHANG Genshou. Extraction of Landform Features and Organization of Valley Tree Structure Based on Delaunay Triangulation Model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(4): 292-298.

[10] 郭庆胜, 杨族桥, 冯科. 基于等高线提取地形特征线的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(3): 253-256.
GUO Qingsheng, YANG Zuqiao, FENG Ke. Extracting Topographic Characteristic Line from Contours[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(3): 253-256.

[11] LI C M, GUO P P, WU P D, et al. Extraction of Terrain Feature Lines from Elevation Contours Using a Directed Adjacent Relation Tree[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(5): 163.

[12] 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.
XIONG Hanjiang, LI Xiujuan. A New Method to Extract Terrain Feature Lines[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(4): 498-502.

[13] 李精忠, 艾廷华, 柯舒. DEM提取谷地线的有效汇水量阈值范围[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(10): 1244-1247.
LI Jingzhong, AI Tinghua, KE Shu. Effective Flow Accumulation Threshold of Extracting Valley-Line from Grid-Based Digital Elevation Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1244-1247.

[14] CHENG L, GUO Q S, FEI L F, et al. Multi-criterion Methods to Extract Topographic Feature Lines from Contours on Different Topographic Gradients[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2022, 36(8): 1629-1651.

[15] GARZÓN A, KAPELAN Z, LANGEVELD J, et al. Machine Learning-Based Surrogate Modeling for Urban Water Networks: Review and Future Research Directions[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(5): e2021wr031808.

[16] TOBLER W R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region[J]. *Economic Geography*, 1970, 46: 234.

[17] 王荣, 闫浩文, 禄小敏. 多尺度等高线簇拓扑关系定量表达方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学

版), 2022, 47(4): 579-588.
WANG Rong, YAN Haowen, LU Xiaomin. Topological Relations Quantitative Expression Method of Multi-scale Contour Cluster[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 579-588.

[18] 李秀娟, 郑先伟, 熊汉江. 离散曲线演化及等高线剖分山脊山谷线提取[J]. 测绘科学, 2015, 40(9): 107-110.
LI Xiujuan, ZHENG Xianwei, XIONG Hanjiang. A Method of Extracting Terrain Feature Lines Based on DCE and Contour Decomposition[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(9): 107-110.

[19] 王宁, 姚志宏. 基于不同算法等高线曲率的提取与分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 144-152.
WANG Ning, YAO Zhihong. Extraction and Analysis of the Contour Curvature Based on Different Algorithms[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1): 144-152.

[20] 杨族桥, 李洪省, 张青. 地形特征约束的等高线群渐进式简化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(4): 480-483.
YANG Zuqiao, LI Hongsheng, ZHANG Qing. Progressive Simplification Methods of Contour Line Group Constrained by Topographic Feature[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4): 480-483.

[21] WOLBERG G. Image Morphing: A Survey[J]. *The Visual Computer*, 1998, 14(8): 360-372.

[22] NÖLLENBURG M, MERRICK D, WOLFF A, et al. Morphing Polylines: A Step Towards Continuous Generalization[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(4): 248-260.

[23] LI Zhilin, WONG M. Animating Basic Operations for Digital Map Generalization with Morphing Techniques[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37(PartB2): 637-642.

[24] 赵彬彬, 戴涛, 王安. 基于OptCor算法的多比例尺线要素综合方法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(2): 92-98.
ZHAO Binbin, DAI Tao, WANG An. A Linear Feature Generalization Method in Multi-scale Maps Based on OptCor Algorithm[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2020, 17(2): 92-98.

[25] 李精忠, 方文江. 顾及邻域结构的线状要素Morphing方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(8): 1138-1143.
LI Jingzhong, FANG Wenjiang. Morphing Polylines by Preserving Local Neighborhood Structures[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1138-1143.

[26] 赵彬彬, 彭东亮, 张山山, 等. 顾及空间关系约束的不同比例尺面目标不一致性同化处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(7): 911-917.
ZHAO Binbin, PENG Dongliang, ZHANG Shanshan, et al. An Assimilation Method of Inconsistency Between Area Objects at Different Scales with Respect to Spatial Relation Constraints[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(7): 911-917.

[27] 赵彬彬. 空间数据不一致性探测处理理论与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2020.
ZHAO Binbin. Theory and Methodology of Spatial Data Inconsistency Detecting and Processing[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2020.

[28] XU Y, ZHAO M W, LU J, et al. Methods for the Construction of DEMs of Artificial Slopes Considering Morphological Features and Semantic Information[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(2): 563-577.

[29] 刘万增, 陈军, 邓喀中, 等. 数据库更新中河流与山谷线一致性检测[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(5): 1003-1008.
LIU Wanzeng, CHEN Jun, DENG Kazhong, et al. Detecting the Spatial Inconsistency Between the Updated Rivers and Valleys[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(5): 1003-1008.

(上接第173页)

[21] 门朝光, 曹刘娟, 孙建国. 基于视觉感知特性的矢量地图可逆水印算法[J]. 高技术通讯, 2010, 20(4): 342-348.
MEN Chaoguang, CAO Liujuan, SUN Jianguo. A Perception-Based Reversible Watermarking Algorithm for 2D-Vector Maps[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2010, 20(4): 342-348.

[22] 袁天洋, 朱长青, 陈会仙, 等. 面向OpenDRIVE格式高精地图的脆弱水印法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230500.
YUAN Tianyang, ZHU Changqing, CHEN Huixian, et al. Fragile Watermarking Algorithm for High Precision Map of OpenDRIVE Format[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230500.