

引用格式:郭文月,刘海砚,孙群,等.面向区域增量更新的等高线群混合相似性度量模型[J].地球信息科学学报,2019,21(2):147-156. [Guo W Y, Liu H Y, Sun Q, et al. A contour group mixed similarity measurement model for region incremental updating[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(2):147-156. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180298

## 面向区域增量更新的等高线群混合相似性度量模型

郭文月<sup>1</sup>, 刘海砚<sup>1</sup>, 孙群<sup>1</sup>, 余岸竹<sup>1</sup>, 陈焕新<sup>2</sup>

1. 信息工程大学, 郑州 450001; 2. 96633 部队, 北京 100096

### A Contour Group Mixed Similarity Measurement Model for Region Incremental Updating

GUO Wenyue<sup>1\*</sup>, LIU Haiyan<sup>1</sup>, SUN Qun<sup>1</sup>, YU Anzhu<sup>1</sup>, CHEN Huanxin<sup>2</sup>

1. Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 2. 96633 Troops, Beijing 100096, China

**Abstract:** Contour line is used to express surface information through curve cluster. The degree of topography change can be reflected based on the similarity between multi-source contour data. Therefore, the similarity measurement of contour groups is an essential step in the map partial renewal, multi-source data merging and cartographic generalization of topographic maps. Previous measurement methods are mainly based on measuring the single topological feature or geometric feature. Due to the complexity of geospatial data and the diversity of geographic elements, the existing methods may not completely reflect the similarities and differences between multi-source data, which may cause inconsistencies in areas with intensive contours or extreme terrain changes and map boundaries in incremental renewal application. For this reason, the spatial similarity theory is introduced and the similarity structure of contour group is built. Through analyzing the relationship and mechanism of the topological relations and geometric features, the hierarchical structure of contour group similarity is constructed, and the mutual relationship and similarity measurement methods of each influencing factor are discussed. Based on the hierarchical structure, a mixed similarity measure model using topological relation tree and geometric similarity measures is proposed. In the mixed measure model, the weight coefficients are calculated based on the analytic hierarchy process. Simulated and real datasets experiments are used to verify the reliability and validity of the similarity measure model proposed in this paper. The experimental results show that: (1) The mixed similarity measure model can quantitatively describe the similarities and differences between contour data from different scales and sources. (2) According to the relationship between the mixed similarity measure results and the update thresholds, partial renewing is applied to the changing areas that meet the update requirements. The accuracy test shows that the proposed similarity measure method has a good validity and reliability.

**Key words:** contour groups; similarity measure; topological similarity; geometric similarity; analytic hierarchy process; map partial renewing

\*Corresponding author: GUO Wenyue, E-mail: guowyer@163.com

收稿日期:2018-06-25;修回日期:2018-12-08.

基金项目:国家自然科学基金项目(41501446、41801388)。[Foundation items: National Natural Science Foundation of China, No.41501446, 41801388.]

作者简介:郭文月(1990-),女,辽宁辽阳人,博士生,研究方向为数字地图制图与遥感影像辅助更新。E-mail: guowyer@163.com

**摘要:**等高线是一种以曲线群簇展现地表起伏形态的表达方式,多源等高线数据之间的相似度能够反映地形地貌的变化程度,因此等高线群的相似性度量是地形图更新、多源数据融合及制图综合领域的关键环节之一。当前的等高线相似性度量方法主要基于要素的单一拓扑特征或几何特征,由于地理空间数据的复杂性和地理要素变化的多样性,这种通过计量多源数据数据单一特征之间的相似与差异程度的方法并不能完整表达多源数据之间的异同,在变化复杂区域、图幅边界区域以及等高线分布密集区域会导致不一致问题。因此,本文引入空间相似度理论,综合探讨了等高线群的相似性层次结构;研究了拓扑特征和几何特征在等高线群相似性度量中的关系和作用机理,构建了等高线群相似性层次结构;讨论了其中各个影响要素的相互关系和相似性度量方法,提出了一种基于拓扑特征和几何特征的区域等高线群混合相似性度量模型,并利用层次分析方法求解各级相似元的权重系数。通过模拟实验和真实数据实验对本文方法的可靠性和有效性进行验证,结果表明:本文提出的等高线群混合相似性度量模型能够定量描述不同尺度不同来源等高线群之间的相似与差异程度,并具有较好的有效性和可靠性;根据本文的混合相似性度量结果和更新阈值之间的关系,对满足更新要求的变化区域实施局部更新,且精度检验表明论文方法能够为等高线数据的更新应用提供可靠依据。

**关键词:**等高线群;相似性度量;拓扑相似度;几何相似度;层次分析法;地形局部更新

## 1 引言

地形数据的相似性度量是实现地理空间数据更新的基础,本质是识别多源多尺度空间数据或变化前后空间数据之间的差异性和相似性,其同时也可应用于多源数据融合及制图综合等领域。早期的常规测绘中等高线数据更新主要采用人工修测方式完成,工作量大、成本高<sup>[1]</sup>,随着遥感技术和计算机技术的发展,利用遥感影像与GIS相结合的地形变化检测及基于不同比例尺的地形图数据联级更新逐渐发展成为等高线数据更新的重要手段<sup>[2]</sup>。面向矢量地形数据自动增量更新应用的量化相似性度量方法与高精度变化检测成为地形图数据更新领域的重要研究方向之一。

在面向地形数据更新的变化检测与相似性度量领域,近年来国内外学者进行了积极探索,成果丰硕,主要可分为基于影像与影像变化检测的方法和基于矢量与矢量相似性度量的方法2大类:①影像与影像之间的变化检测是利用不同时期或不同来源同一区域的影像数据,通过匹配叠加、变化信息提取、像元灰度值等方法来检测对应点水平位置的高程差异,如Radke<sup>[3]</sup>对基于影像的变化检测算法进行了系统研究,李德仁等<sup>[4-5]</sup>提出了利用地形变化检测实现DEM数据自动同步更新算法,段修梅<sup>[6]</sup>基于变化检测方法设计了1:5万地形要素更新方法。基于遥感影像的变化检测方法主要面向DEM数据更新,而利用DEM数据进行地形图等高线更新时通常是面向全图幅或多图幅的大范围整体更新,但由于地貌随时间变化不明显的特点,这种基于影像变化检测的大范围整体更新会导致大量非必要更新,且在图廓边界需要进行大量的断裂分析与接边处理工作,降低了等高线数据的更新效率。②为了

解决上述问题,国内外学者对基于矢量数据相似性度量的等高线局部增量更新方法进行了研究。通过对不同时期不同来源的等高线数据所包含的几何、拓扑或属性特征进行对比分析,发现等高线变化区段,进而对变化区段实施局部更新,如周晓光等<sup>[7]</sup>、邢汉发等<sup>[8]</sup>为实现等高线增量信息监测与融合,提出了一种基于拓扑关系和处理规则构建的等高线自动化变化检测与更新方法,Alt等<sup>[9]</sup>、刘鹏程等<sup>[10]</sup>提出了基于线划间距离或面积差的相似性度量方法,利用线划之间的空间欧式距离或面积差衡量等高线之间形态和高程的差异。但由于等高线以簇群为单位表达地形,在实际更新应用中,这类以单一等高线线划为单位的更新方式较易造成等高线间的不一致甚至位置冲突问题,且基于单一拓扑或几何特征的相似性度量方法由于对区域变化顾及较少<sup>[11-12]</sup>,难以区分等高线数据的变化类型与程度,易受系统误差影响,造成度量偏差。

针对上述方法在等高线更新应用中存在的问题,本文引入空间相似性理论,综合探讨等高线群间的拓扑特征、几何特征及其在相似性度量中的层次结构与计算方法,提出面向增量更新应用的等高线群混合相似性度量模型,并利用层次分析法求解各级相似元权重系数,依据相似性度量对多源多尺度等高线数据间地形变化类型与变化程度进行定量描述,进而辅助地形图局部增量更新,利用模拟实验和真实数据实验对该方法的有效性和可靠性进行验证。

## 2 相似性定义及层次结构

### 2.1 相似性定义

空间相似性理论认为,对于2个地理空间目标

$A_1, A_2$ , 若  $A_1, A_2$  的非空特征集  $C_1 \cap C_2 = C_n \neq \emptyset$ , 则称特征集  $C_n$  为目标  $A_1, A_2$  的空间相似关系, 其强弱由相似度衡量<sup>[13]</sup>。空间实体之间的相似特征集合可概括为空间关系相似(拓扑、方向和距离等)、几何特征相似(位置、维数等)和属性(语义)相似<sup>[14]</sup>。

在以簇群为单位的等高线特征描述中, 用于相似度计算的空间关系特征主要表现为等高线群内部线-线拓扑关系集合, 空间几何特征主要表现为线群内部曲线的线群分布密度、几何形态、曲线长度以及空间位置(高程值)等信息的集合。因此, 等高线的特征集合可描述为:

$$C = \{T, G\} \quad (1)$$

式中:  $T = \{Topology\}$ ,  $G = \{Shape, Length, Density, Elevation \dots\}$ 。等高线群内部的线-线拓扑关系  $T$  可通过构建拓扑关系树获得, 空间几何特征  $G$  包含的线群密度、几何形态、曲线长度等信息主要由构成等高线的节点序列空间位置信息计算获得, 等高线高程值信息可直接或通过差值获得, 是辅助判别同名等高线的重要指标。

根据等高线特征集的定义, 在度量等高线群间的相似性时, 需要分别计算等高线群的拓扑相似度及几何相似度, 并赋予各个因子合适的权重系数, 得到混合相似性度量模型, 进而根据多源等高线群之间的相似性度量结果, 量化表示局部地形变化程度。

## 2.2 相似性度量层次结构

设等高线群  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_K\}$ ,  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_L\}$ , 若等高线群  $A$  中的某等高线要素  $A_i$  与等高线群  $B$  中的等高线要素  $B_j$  的空间特征相似程度达到阈值

要求, 则称  $A_i, B_j$  为等高线群  $A, B$  之间的要素相似元。基于第2.1节对等高线特征集合的讨论, 等高线要素包含拓扑和几何等多个空间特征, 设等高线要素  $A_i$  的特征集为  $C_i^A = \{C_{i,1}^A, C_{i,2}^A, \dots, C_{i,k}^A\}$ , 等高线要素  $B_j$  的特征集为  $C_j^B = \{C_{j,1}^B, C_{j,2}^B, \dots, C_{j,l}^B\}$ , 若线要素  $A_i$  特征集中的特征  $C_{i,t}^A$  与线要素  $B_j$  特征集中的特征  $C_{j,s}^B$  属同一类型, 且特征值相同或特征差值满足相似要求, 则  $C_{i,t}^A$  与  $C_{j,s}^B$  为线要素  $A_i, B_j$  的特征相似元。

要素相似元与特征相似元具有层次关系, 要素相似元是特征相似元的上一层次<sup>[15]</sup>, 根据应用领域和数据特征, 可细分为更多层次。基于等高线空间关系和相似性特征, 等高线群相似性与要素相似元和特征相似元之间的关系可用图1的层次结构表示。

等高线群之间的相似程度由其所包含的等高线要素之间的相似程度决定, 等高线要素的相似度受特征相似元的相似程度影响。因此, 本文分别研究等高线群空间拓扑特征、空间几何特征(包括密度、形态、长度、高程)的相似性度量方法, 并通过赋予各个因子合适的权重系数, 最终获得等高线群混合相似性度量模型。

## 3 相似性度量模型

### 3.1 拓扑相似性度量

等高线拓扑关系的研究工作已经十分丰富, 根据闭合等高线的拓扑性质和高程属性, 等高线之间的拓扑关系分为包含关系和并列关系。当等高线  $A_1$  与  $A_2$  之间不存在其他等高线, 且等高线  $A_1$  位于等

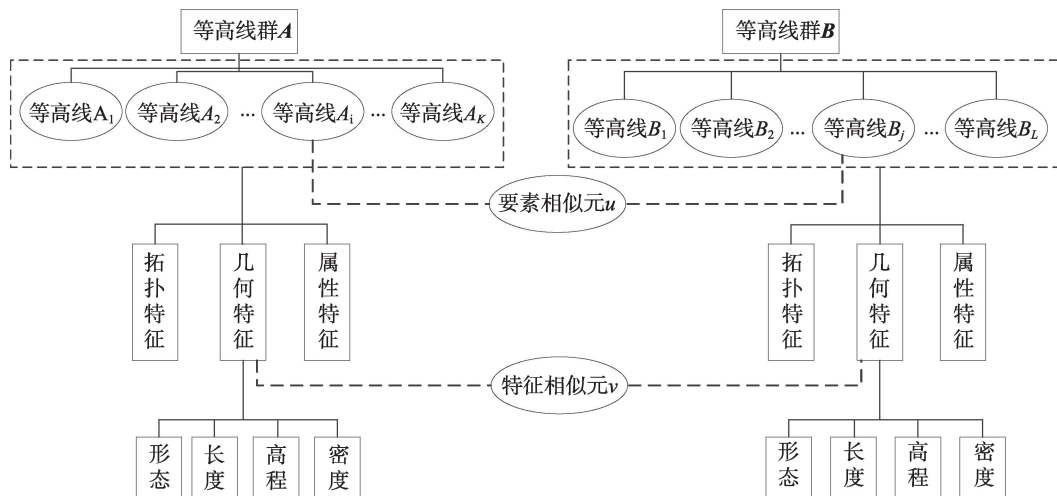


图1 等高线群相似性层次结构

Fig. 1 Similarity hierarchy of contour group

高线 $A_2$ 围成的面域内部时,称等高线 $A_1$ 被 $A_2$ 包含, $A_1$ 与 $A_2$ 之间为包含关系;当等高线 $A_1$ 与 $A_2$ 高程值相等,两条等高线围成的面域不相交,且两条等高线均在同一等高线围成的面域内部时,称等高线 $A_1$ 与 $A_2$ 之间为并列关系。

等高线树是用于表示等高线空间拓扑关系的主要方法<sup>[16]</sup>,在基于等高线结点法<sup>[17-18]</sup>的等高线拓扑关系树中包含关系和并列关系分别由一阶相邻的父子结点和二阶相邻的兄弟结点来表现。如图2(a)所示的等高线群,以等高线为结点,以等高线之间的拓扑关系为连接线,对应的等高线拓扑关系树如图2(b)所示。其中, $A_1$ 与 $A_2$ 、 $A_3$ 为父子结点, $A_2$ 与 $A_4$ 之间为父子结点,父子节点间存在包含关系; $A_2$ 与 $A_3$ 为兄弟节点,兄弟节点间存在并列关系。除了具有包含关系和并列关系之外的等高线之间为不相邻关系。

由图2可知,在等高线拓扑关系树中,父子结点之间是一阶相邻,而兄弟结点之间是二阶相邻,故可认为父子结点之间的相关程度高于兄弟结点以及其他不相邻结点之间的相关程度,即结点之间的包含关系高于并列关系,并列关系高于不相邻关系。在此基础上建立对应的拓扑关系差异矩阵如表1所示。对于等高线群中的每条等高线,据其拓扑情况分别赋予对应的权值,如对于包含等高线数为 $K$ 的等高线群 $A$ ,其中第 $i$ 条等高线分别有一个父结点、一个子结点以及一个兄弟结点,则该条等高

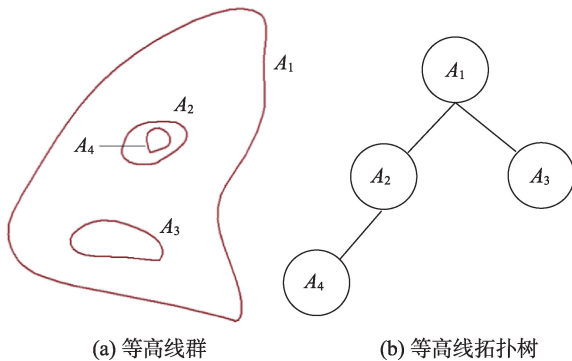


图2 等高线与等高线拓扑树

Fig. 2 Contour tree and topological relation tree

表1 等高线之间的拓扑邻域差异矩阵

Tab. 1 Topological neighborhood difference matrix

between contours

	不相邻	并列	包含
不相邻	0	1	2
并列		0	1
包含			0

线的拓扑权值  $T_i^A = 2 + 2 + 1 = 5$ 。按照该方法计算,对于包含等高线总数分别为 $K$ 和 $L$ 的等高线群 $A$ 、 $B$ ,其拓扑相似度可定义为:

$$Sim\_topo(A, B) = 1 - |H_A - H_B| / \max(H_A, H_B) \quad (2)$$

式中:  $H_A = \sum_{i=1}^K T_i^A / K$ ,  $H_B = \sum_{j=1}^L T_j^B / L$ ;  $Sim\_topo(A, B)$

为2个等高线群之间的拓扑相似度。以图3(a)、(b)所示的不同来源等高线数据的相应等高线群 $A$ 、 $B$ 为例,由图3(c)、(d)对应的等高线树可知, $H_A = 3.6667$ ,  $H_B = 4.1667$ ,则等高线群 $A$ 、 $B$ 之间的拓扑相似程度可量化表示为  $Sim\_topo(A, B) = 1 - |3.6667 - 4.1667| / 6 = 0.9167$ 。

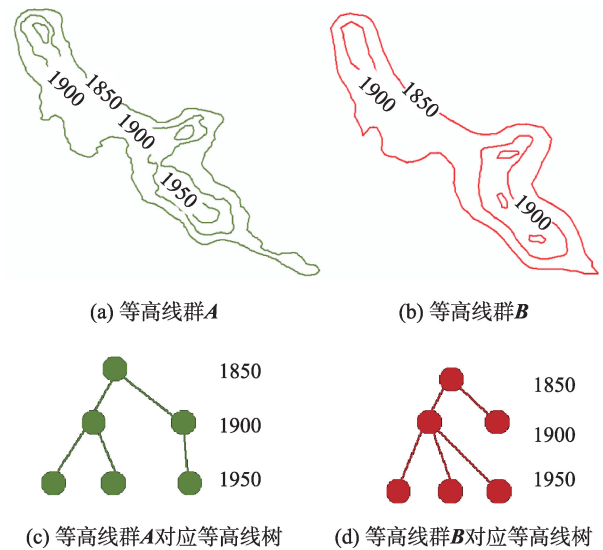


图3 等高线群拓扑相似性度量

Fig. 3 Topological similarity measurement between contour groups

### 3.2 几何相似性度量

等高线群之间的几何相似度由线群内部要素相似元之间几何相似度决定。设等高线群 $A$ 中等高线线划 $A_i$ 与等高线群 $B$ 中等高线线划 $B_j$ 为对应相似等高线,记为要素相似元 $u_i$ ,要素相似元之间的相似程度记为 $q(u_i)$ ,则2个等高线群之间的几何相似度可表示为<sup>[19]</sup>:

$$Sim\_geo(A, B) = \frac{R}{K + L - R} \sum_{i=1}^R q(u_i) \quad (3)$$

式中: $K$ 、 $L$ 、 $R$ 分别为等高线群 $A$ 和 $B$ 各自包含的等高线要素数量及其间要素相似元数量; $q(u_i)$ 为第 $i$ 个要素相似元的相似度值。

由于形态、大小、长度、密度和位置特征是线状要素几何相似性度量过程中的重要衡量指标<sup>[20]</sup>,因

此应以等高线的形态、长度以及高程值等特征相似元之间的相似值作为计算等高线群线要素之间相似元的依据,并以等高线群要素相似元之间的几何相似程度衡量等高线群之间的几何相似度。

#### (1) 形态相似性度量

曲线几何形态由构成曲线包含的二维节点序列的几何特征表示,基于形态的相似性度量过程一般包含形态特征提取和形态特征匹配<sup>[21]</sup>。

设两条不同来源等高线  $A$ 、 $B$  的二维节点序列中节点个数分别为  $n$  和  $m$ , 则其可分别表示为  $A=((a_{x,1}, a_{y,1}), (a_{x,2}, a_{y,2}), \dots, (a_{x,n}, a_{y,n}))$ 、 $B=((b_{x,1}, b_{y,1}), (b_{x,2}, b_{y,2}), \dots, (b_{x,m}, b_{y,m}))$ 。利用特征描述函数  $f$  将二维节点序列提取为特征描述序列  $A_i=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 、 $B_i=(b_1, b_2, \dots, b_m)$ , 即  $f:(a_{x,p}, a_{y,p}) \rightarrow a_p$ ;  $f:(b_{x,q}, b_{y,q}) \rightarrow b_q$ ;  $p=1, 2, \dots, n$ ;  $q=1, 2, \dots, m$ 。特征描述函数应选择能够反映等高线几何形态特征的函数,图形学领域的研究表明,曲率<sup>[22]</sup>、凹凸形态<sup>[23]</sup>以及弦长<sup>[24]</sup>等特征描述函数在曲线几何形态识别与检索过程中均具有较好效果。基于文献[25]中的策略,将包含节点个数分别为  $n$ 、 $m$  的多源等高线  $A_i$ 、 $B_i$  之间形态相似度定义为:

$$q(S_i) = \frac{N(A_i, B_i)}{\max(n, m)} \quad (4)$$

式中:  $N(A_i, B_i)$  为等高线  $A_i$ 、 $B_i$  特征描述序列中满足匹配要求的形态特征个数;  $q(S_i) \in [0, 1]$ 。  $q(S_i)$  值越接近 1, 说明两条等高线的几何形态越相似。

#### (2) 长度相似性度量

长度是线状要素的基本特征,根据曲线长度公式和等高线包含节点个数计算等高线长度,由  $n$  个二维节点组成的等高线  $A_i$  的曲线长度可表达为  $L^{A_i} = \sum_{p=1}^n \sqrt{(a_{x,p} - a_{x,p+1})^2 + (a_{y,p} - a_{y,p+1})^2}$ , 因而多源等高线  $A_i$ 、 $B_i$  间的曲线长度相似性可表达为:

$$q(L_i) = 1 - \frac{|L^{A_i} - L^{B_i}|}{\max(L^{A_i}, L^{B_i})} \quad (5)$$

式中:  $L^{A_i}$ 、 $L^{B_i}$  分别为等高线  $A_i$ 、 $B_i$  的曲线长度,  $q(L_i) \in [0, 1]$ 。

#### (3) 高程值信息

等高线的属性特征主要指高程值信息,因而在判别多源等高线  $A_i$ 、 $B_i$  是否为相似等高线时需要考虑高程值指标,依高程值  $E^{A_i}$  与  $E^{B_i}$  是否相等,其属性相似度可表示为:

$$q(E_i) = \begin{cases} 0 & E_i^A \neq E_i^B \\ 1 & E_i^A = E_i^B \end{cases} \quad (6)$$

以等高线长度和形态相似度作为相似元相似程度的定量描述指标,以高程值作为判断是否是相似元的定性约束,结合式(3)–式(6),可以得到相似等高线的定量判定公式:

$$q(u_i) = q(E_i) \times (\lambda_1 q(S_i) + \lambda_2 q(L_i)) \quad (7)$$

式中:  $q(E_i)$ 、 $q(S_i)$ 、 $q(L_i)$  分别等高线群内部包含的等高线之间的高程相似度、形态相似度和长度相似度;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分为形态相似度和长度相似度的权重值。当  $q(u_i)$  满足到阈值要求时,则认为等高线  $A_i$ 、 $B_i$  为相似等高线,即等高线群  $A$ 、 $B$  之间的要素相似元。

基于式(3)以及式(5)–式(7),可得等高线群  $A$ 、 $B$  之间的几何形态相似度和长度相似度:

$$Sim\_shp(A, B) = \frac{R}{K+L-R} \sum_{i=1}^R \beta_i q(E_i) \left( \frac{N_i^{A_i, B_i}}{\max(N_i^A, N_i^B)} \right) \quad (8)$$

$$Sim\_len(A, B) = \frac{R}{K+L-R} \sum_{i=1}^R \beta_i q(E_i) \left( 1 - \frac{|L_i^A - L_i^B|}{\max(L_i^A, L_i^B)} \right) \quad (9)$$

式中:  $\sum_{i=1}^R \beta_i = 1$ 。

#### (4) 线群密度

等高线群的线群密度可以定义为单位高程差内等高线群包含的等高线要素个数,等高线群  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$  的线群密度记为  $D_A = K / (E_{\max}^A - E_{\min}^A)$ , 其中  $K$  为等高线群  $A$  中包含的等高线条数,  $E_{\max}^A$ 、 $E_{\min}^A$  分别为等高线群所在范围的最大高程值与最小高程值,则分别包含  $K$  条等高线和  $L$  条等高线的等高线群  $A$ 、 $B$  之间的线群密度相似度可定义为:

$$Sim\_den(A, B) = 1 - \frac{|D_A - D_B|}{\max(D_A, D_B)} \quad (10)$$

### 3.3 混合相似性度量模型

基于等高线群相似性层次划分以及各级相似元相似度计量方法,多源等高线群间的混合相似性度量模型可表达为:

$$Sim(A, B) = \gamma_1 Sim\_topo(A, B) + \gamma_2 Sim\_den(A, B) + \gamma_3 Sim\_shp(A, B) + \gamma_4 Sim\_len(A, B) \quad (11)$$

式中:  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 、 $\gamma_4$  分别为等高线群拓扑相似度、线群密度、几何形态、长度相似度的权重值,  $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 = 1$ 。

确定上述公式中的各个权重系数成为求解等高线群相似性的必要步骤,需要考虑拓扑、密度、形态、长度等各影响要素在式中的重要性关系。基于空间目标的相似性度量中拓扑关系起主导作用,其他可度量的关系起提炼作用的原则<sup>[26]</sup>,且基于事件的时空数据模型理论认为,当地理对象的属性值达到阈值时将触发地理事件<sup>[27]</sup>,即量变积累导致质变。对于等高线要素,地形变化首先导致等高线长度和形态发生变化,即几何特征首先发生变化,变化积累到等高差阈值时,将导致等高线间的拓扑关系变化。因此,在等高线群的相似性度量中,拓扑差异的影响程度大于几何差异的影响程度,线群密度的影响程度大于单一线划的形态和长度影响程度,而线划形态差异的影响程度大于长度的影响程度。基于此认知,结合等高线群相似性度量的层次结构模型和各级相似元计量公式,利用定性与定量相结合的层次分析(The Analytic Hierarchy Process, AHP)方法<sup>[28]</sup>确定式中涉及各个权重值,构建如图4所示的混合相似性度量多级层次分析模型,并基于拓扑、密度、形态、长度等要素重要性的两两比较,得出相对重要程度比较权,建立如表2所示的判断矩阵,进而依AHP算法求解得出各个因子的最终权重值。

由判断矩阵计算获得权重向量 [0.5462

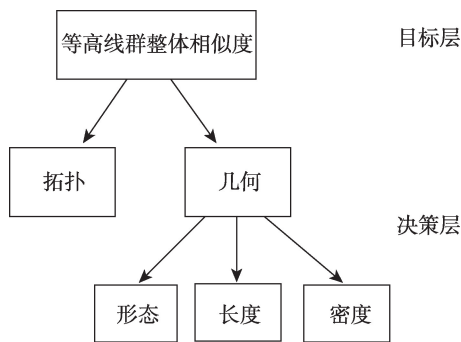


图4 混合相似性度量层次分析模型

Fig. 4 Analysis hierarchical model of overall similarity measure

表2 等高线群混合相似性度量权重判断矩阵  
Tab. 2 Weight judgement matrix of contour group similarity measure

	拓扑	密度	形态	长度
拓扑	1	3	4	5
密度	1/3	1	2	3
形态	1/4	1/2	1	2
长度	1/5	1/3	1/2	1

0.2323 0.1377 0.0838],判断矩阵的一致性检验指标  $crl=0.0076<1$ ,表明构建的权重判断矩阵符合要求,权值计算结果有效。所得到等高线群混合相似性度量模型中各个影响要素的权重系数值为:

$$\begin{cases} \gamma_1 = 0.55 \\ \gamma_2 = 0.23 \\ \gamma_3 = 0.14 \\ \gamma_4 = 0.08 \end{cases} \quad (12)$$

将权重值代入混合相似性度量公式,最终可得等高线群之间相似度的量化度量方式。

$$\begin{aligned} Sim(A,B) = & 0.55Sim\_topo(A,B) \\ & + 0.23Sim\_den(A,B) \\ & + 0.14Sim\_shp(A,B) \\ & + 0.08Sim\_len(A,B) \end{aligned} \quad (13)$$

根据等高线群之间的混合相似度值  $Sim(A,B)$  与变化阈值  $\varepsilon$  之间的关系,判断是否需要局部数据更新,当  $Sim(A,B) \leq \varepsilon$ ,说明该区域等高线群变化较剧烈,应利用现势性和准确度更高的数据替换原有数据,实现地形数据的局部增量更新。

## 4 实验与分析

### 4.1 模拟实验

等高线相似性度量与变化检测是多源多尺度地形图数据融合、地形数据生产以及地形图局部数据更新等领域的重要环节。为验证本文方法在多源多尺度等高线群相似性度量中的有效性,模拟实验利用 ASTER GDEM 数据和 SRTM 数据分别生成不同等高距的模拟特定比例尺等高线数据。ASTER GDEM 数据采用的是由 NASA 对地观测卫星获取于 2009 年的光学影像进一步制作完成的 30 m 分辨率 V1 版本 DEM 数据, SRTM 数据是由成像于 2000 年的合成孔径雷达影像进一步制作生成的 90 m 分辨率 DEM 数据,由于 2 种数据在成像时间、传感器和精度等方面存在差异,因而由其生成的同区域等高线数据的几何特征和拓扑特征也存在一定的相似性与差异性。模拟实验由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>) 获取上述 2 种 DEM 数据,并模拟生成同一区域、不同时期、不同比例尺等高线数据,如图 5 所示,利用本文提出的混合相似性度量方法与单一特征相似性度量方法对各组数据之间的共同性与差异性进行量化度量,验证本文方法在多源多尺度等高线群相似性度量与变化检测中的有效性。

图5为3组不同比例尺等高线数据,图5(a)为由ASTER GDEM影像生成的模拟1:2.5万地形图5 m高差等高线群,包含71条等高线,高程范围为500~600 m;图5(b)为该区域不同时期SRTM影像生成的模拟1:5万地形图10 m高差等高线群,包含27条等高线,高程范围为500~600 m;图5(c)为该区域同样SRTM影像生成的模拟1:10万地形图20 m高差等高线群,包含13条等高线,高程范围为500~600 m。基于本文方法分别对等高线群a~c之间的拓扑、密度、形态以及长度相似性进行度量,并最终基于混合相似性度量模型计算等高线群之间的相似程度,获得如表3所示结果。

利用本文方法分别计算不同来源不同尺度等高线群a~c之间的相似程度,获得如表3所示实验结果,对基于不同特征的相似性度量结果进行分析:

(1)表3所示为基于单一几何或拓扑特征的相似性度量结果以及本文提出的混合相似性度量结果。由单一拓扑特征的相似性度量结果可知,拓扑相似性体现不同等高线群之间的结构关系差异,由于等高线群b、c属于同源目标,因而等高线群内部的拓扑相似性较高,而等高线群a、c,等高线群a、b由于数据源的现势性与精度不同,因而其包含的拓扑关系差异相对较大,拓扑相似性度量体现的是地形结构的变化;由单一密度相似性度量结果可知,不同来源等高线数据之间的密度相似程度受比例尺影响较大,因为不同比例尺对应特定等高距,因而相邻比例尺等高线数据之间的密度相似程度大于跨比例尺等高线数据之间的密度相似程度;由单

一形态和单一长度相似性度量结果受原始遥感影像分辨率影响较大,同源数据之间的形态和长度相似性较高。由表3可知,在对多源多尺度等高线群进行相似性度量时,基于不同单一特征的度量结果在数值上存在差异,易受系统误差和原始数据精度影响,不能完全反映不同等高线群之间的共同性与差异性。

(2)对实验结果进一步分析可知,由于等高线群b、c属于同源目标,因而等高线群内部的拓扑关系相似性较高,但由于比例尺不同、等高距不同而导致线群密度、几何形态以及长度存在一定差异;等高线群a与b、c属于不同来源不同比例尺目标,由于成像时间、原始数据精度以及比例尺不同,不仅几何形态、线群密度和长度存在一定差异,且等高线群之间的拓扑相似性相对较低。

(3)由本文提出的混合相似性度量结果可知,对于多源多尺度等高线目标,等高线群a、b和等高线群a、c的混合相似性度量结果表明同一地区、不同时期、不同尺度等高线数据在拓扑结构、线群密度、几何形态及线划长度等方面均会产生一定变化,且随着比例尺跨度的增大混合相似性逐步降低。等高线群a、c间的混合相似性小于等高线群a、b和等高线群b、c间的混合相似性,符合跨比例尺地形数据的相似程度小于邻近比例尺的地形数据这一规律。混合相似性度量根据等高线群相似性层次结构模型,综合考量了多源多尺度数据的拓扑结构、线群密度、线划形态、长度等拓扑和几何特征,其度量结果既能够反映不同时期地形变化导致

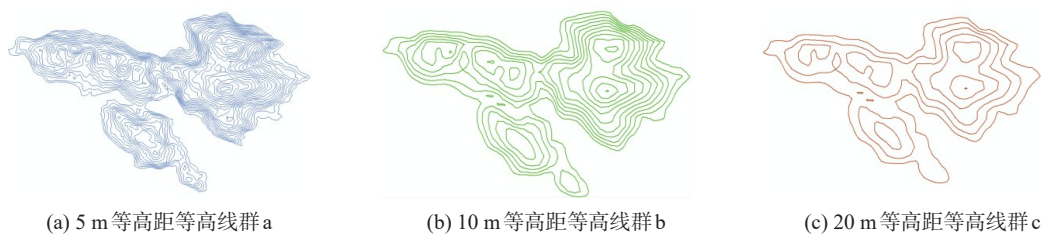


图5 模拟等高线群数据

Fig. 5 Simulated contour group datasets

表3 等高线群相似性度量

Tab. 3 The similarity measure of contour groups

等高线群	拓扑相似性	密度相似性	形态相似性	长度相似性	混合相似性
a-b	0.61	0.38	0.34	0.57	0.52
a-c	0.65	0.18	0.30	0.37	0.47
b-c	0.89	0.48	0.59	0.64	0.74

的等高线拓扑结构变化和形态变化,也能够一定程度上体现不同来源数据之间的系统误差,相交于单一特征的相似性度量,其度量结果更加可靠。

## 4.2 真实数据实验

将本文提出的等高线群相似性度量方法应用于基于DEM数据的地形图局部更新,并将更新后的高程值与区域内控制点高程值进行对比,探讨更新阈值与更新精度的合理配置,进而验证本文提出方法在等高线数据局部更新中的有效性。

实验利用法国某地提取自SRTM并经制图综合处理的1:25万50 m等高距等高线数据作为原始待更新数据,高程范围约为0~800 m,以该地区2014年获取的资源三号卫星影像作为辅助更新的资料数据,资源三号遥感影像源自中国资源卫星应用中心,是中国民用高分辨率光学传输型立体测图卫星资源三号所获取的三线阵影像,经几何定位、纠偏以及人工处理生成同区域DEM数据,其高程精度约为3 m,满足1:25万等高线数据的更新精度要求。利用DEM数据生成与原始等高线同范围、同等高距的等高线,实验区原始等高线数据及由遥感影像生成的更新资料数据如图6所示。

主要实验步骤如下:

(1)首先将原始等高线数据与ZY-3号影像生成的等高线数据进行配准,基于高程值、空间位置关

系及拓扑关系,对实验区域进行等高线群划分。在每个等高线群内部生成等高线树,对于由于图幅边界限制导致的非闭合情况,依文献[29]中的策略,将等高线进行闭合处理以及逻辑统一。

(2)基于空间位置邻近原则,搜索不同来源数据之间的相应等高线群,在每组对应的等高线群内部,依据本文提出的方法分别计算相应等高线群之间的拓扑相似度、密度相似度、形态相似度和长度相似度,进而依公式计算等高线群之间的混合相似程度,对局部地形变化程度进行定量度量。图7为不同数据源中同一组等高线群样本,原始样本等高线群与资料数据对应等高线群的拓扑、密度、形态、长度及混合相似度如表4所示。

对于此组等高线样本,更新资料数据与原始数据的拓扑相似度较高,而几何形态相似度较低,基于本文提出的混合相似性度量结果为0.64,在进行更新应用时,需要依据等高线群之间的混合相似程度与更新阈值的大小来判断是否需要进行局部等高线数据更新。当更新阈值小于0.64时,说明此组等高线的变化程度不显著,未达到更新对变化的要求,需保留原有等高线群;当更新阈值大于或等于0.64时,说明此组等高线的变化程度较为明显,达到更新应用对变化的要求,需用现势性和精度更高的等高线群替代原有等高线群。

(3)由上述讨论可知,在进行局部更新应用时,

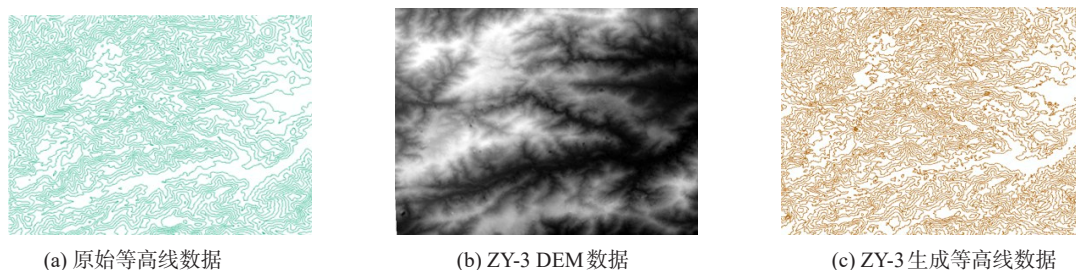


图6 原始等高线数据及更新资料数据

Fig. 6 Original contour dataset and reference data for updating

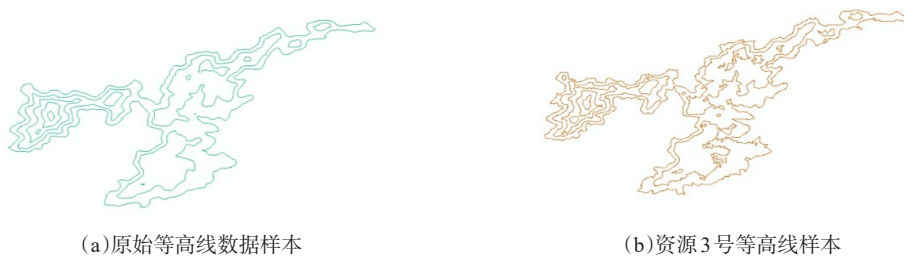


图7 多源等高线数据对应等高线群样本

Fig. 7 Corresponding contour samples from multi-source data

表4 样本相似性度量结果

Tab. 4 Similarity measurement results of sample data

拓扑相似度	密度相似度	形态相似度	长度相似度	混合相似度
0.71	0.75	0.08	0.82	0.64

需要根据相应等高线群之间的混合相似度值与更新阈值的大小来判断是否进行局部等高线数据更新。更新阈值的大小在一定程度上影响更新结果的准确性,如果阈值设置过大,会导致对变化很小或没有变化的地物的误更新,且增大了工作量,如果阈值设置过小,会造成对一些变化较大地物的漏更新,导致更新后的地形图数据精度较差。为此,本实验取阈值为0.7、0.8、0.9进行实验,并对不同阈值对应的更新数据量进行比较,由图8所示结果可知,更新数据量随阈值的增大而增大。

(4)对更新后的数据进行正确性检验。为验证不同更新阈值对应的更新结果的准确程度,以区域内控制点水准高作为标准,计算更新后该处的高程值与控制点水准高均方根误差,依均方根误差值大小判断更新结果准确性,结合更新精度要求及更新数据量的不同,合理选取更新阈值。表5所示为不同更新阈值对应的精度检验结果,结合图8所示的更新

表5 不同更新阈值对应的结果精度对比

Tab. 5 Accuracy comparison of results corresponding to different thresholds (m)

$\varepsilon$	$ h_i - \hat{h}_i $			RMSE
	检查点1	检查点2	检查点3	
0.6	3.33	6.43	0.31	4.18
0.7	3.33	0.77	0.31	1.98
0.8	3.33	0.77	1.24	2.10

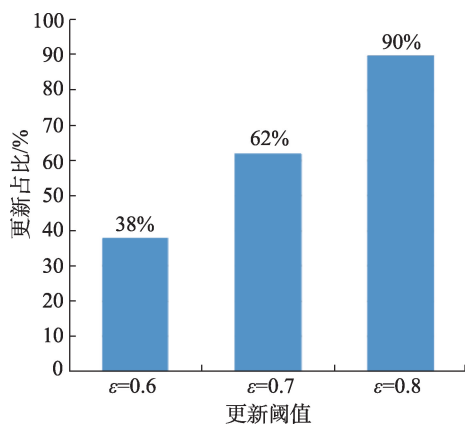


图8 不同更新阈值下的更新量

Fig. 8 Different updating volume under different threshold value

数据量,在本实验区内,更新阈值设定为0.7时既能保证较高的更新精度,又能保证合理的更新效率。

综上所述,本文提出的基于混合相似度的等高线群相似性度量方法能够量化表示多源多尺度地形数据之间的拓扑和几何差异,以混合相似度值大小衡量地形数据变化程度,基于拓扑相似度值和几何相似度值能够在一定程度上区分系统误差和地形变化,进而有效辅助多源地形数据融合与更新。

## 5 结语

等高线相似性度量是地形图更新与融合的重要环节之一,面向矢量地形图等高线局部增量更新与融合应用,本文提出一种基于特征层次结构的混合相似性度量模型,通过探讨拓扑特征、几何特征及其在混合相似性度量中的层次结构及计量方法,构建等高线群混合相似性度量模型,并基于层次分析方法求取各影响要素的权重系数。模拟实验和真实数据实验证明,本文方法能够有效区分并定量呈现多源多尺度等高线数据之间的相似程度,通过合理的更新阈值设定,能够有效辅助地形图局部增量更新。进一步优化拓扑相似性和几何相似性的计算方法,将有效提高相似性度量和变化检测的准确性。

## 参考文献(References):

- [1] 刘朋飞.基于矢量数据的中低分辨率影像道路提取和变化检测研究[D].武汉:武汉大学,2010. [Liu P F. Research on road extraction and change detection from medium or low resolution images with vector data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. ]
- [2] 王丽云,李艳,汪禹芹.基于对象变化矢量分析的土地利用变化检测方法研究[J].地球信息科学学报,2014,16(2): 307-313. [Wang L Y, Li Y, Wang Y Q. Research on land use change detection based on an object-oriented change vector analysis method[J]. Journal of Geo-information Science, 2014,16(2):307-313. ]
- [3] Radke R J, Andra S, Al-Kofahi O, et al. Image change detection algorithms: A systematic survey[J]. IEEE transactions on image processing, 2005,14(3):294-307.
- [4] 李德仁,夏松,江万寿,等.一种地形变化检测与DEM更新的方法研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2006,31(7): 565-568. [Li D R, Xia S, Jiang W T, et al. Approach for terrain change detection and DEM updating[J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2006,31(7):565-568. ]
- [5] 李德仁,夏松,江万寿.基于正射影像匹配的地形变化检测与更新算法[J].地理与地理信息科学,2006,22(6):9-11. [Li D R, Xia S, Jiang W T. Approach for terrain change

- detection and updating based on orthoimage matching[J]. Geography and Geo-information Science, 2006,22(6):9-11. ]
- [6] 段修梅. 基于1:1万地形数据更新1:5万DEM的方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2012. [ Duan X M. Updating method of 1:50 000 scale DEM based on 1:10000 scale terrain data[D]. Changsha: Central South University, 2012. ]
- [7] 周晓光,汪红松,吴志强. 引入二维交细分类类型的地表覆盖矢量数据增量更新[J]. 测绘学报, 2017,46(1):114-122. [ Zhou X G, Wang H S, Wu Z Q. An incremental updating method for land cover database using refined 2-dimensional intersection type[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 2017,46(1):114-122. ]
- [8] 邢汉发,周晓光,许礼林. 基于线/线拓扑关系的局部变化等高线融合[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010,35(11):1322-1326. [ Xing H F, Zhou X G, Xu L L. Local contour line fusion based on line/line topological relations[J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2010,35(11):1322-1326. ]
- [9] Alt H, Godau M. Computing the Fréchet distance between two polygonal curves[J]. International Journal of Computational Geometry & Applications, 1995,5(01n02):75-91.
- [10] 刘鹏程,艾廷华,杨敏. 基于傅里叶级数的等高线网络渐进式传输模型[J]. 测绘学报, 2012,41(2): 284-290. [ Liu P C, Ai T H, Yang M. The internet progressive transmission model for contour based on Fourier series[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 2012,41(2):284-290. ]
- [11] 唐炉亮,杨必胜,徐开明. 基于线状图形相似性的道路数据变化检测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008,33(4):367-370. [ Tang L L, Yang B S, Xu K M. The road data change detection based on linear shape similarity[J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2008, 33(4):367-370. ]
- [12] 刘涛,杜清运,闫浩文. 空间点群目标相似度计算[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011,36(10):1149-1153. [ Liu T, Du Q Y, Yan H W. Spatial similarity assessment of point clusters[J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2011,36(10):1149-1153. ]
- [13] 闫浩文,褚衍东. 多尺度地图空间相似关系基本问题研究[J]. 地理与地理信息科学, 2009,25(4):42-44. [ Yan H W, Chu Y D. On the fundamental issues of spatial similarity relations in multi-scale maps[J]. 2009,25(4):42-44. ]
- [14] 刘涛,杜清运,毛海辰. 空间线群目标相似度计算模型研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012,37(8):992-995. [ Liu T, Du Q Y, Mao H C. Spatial similarity assessment model and its application in line groups[J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2012,37(8):992-995. ]
- [15] 安晓亚. 空间数据几何相似性度量理论方法与应用研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2011. [ An X Y. Research on theory, methods and applications of geometry Similarity Measurement for Spatial Data[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011. ]
- [16] 宋敦江,岳天祥,杜正平等. 等高线树构建及高保真DEM构建[J]. 中国图象图形学报, 2011,16(7):1255-1261. [ Song D J, Yue T X, Du Z P. Constructing contour tree and DEM construction of high fidelity[J]. Journal of Image and Graphics, 2011,16(7):1255-1261. ]
- [17] Cronin T. Automated reasoning with contour maps[J]. Computers and Geosciences, 1995,21(5):609-618.
- [18] Cronin T. Classifying hills and valleys in digitized terrain [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2000,66(9):1129-1137.
- [19] 夏慧琼,李德仁,郑春燕. 基于相似度理论的时空变化定量描述方法[J]. 地理与地理信息科学, 2010,26(3):1-5. [ Xia H Q, Li D R, Zheng C Y. A method of qualitative change about spatio-temporal object based on similarity theory[J]. Geography and Geo-information Science, 2010,26(3):1-5. ]
- [20] 孙群. 空间数据相似性研究的若干基本问题[J]. 测绘科学技术学报, 2013,30(5):439-442. [ Sun Q. Research on some fundamental issues of spatial data similarity[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013,30(5):439-442. ]
- [21] 韩敏,郑丹晨. 基于模糊形态上下文特征的形态识别算法[J]. 自动化学报, 2012,38(1):68-75. [ Han M, Zheng D C. Shape recognition based on fuzzy shape context[J]. Acta Automatica Sinica, 2012,38(1):68-75. ]
- [22] Mokhtarian F, Abbasi S, Kittler J. Efficient and robust retrieval by shape content through curvature scale space[M]// Image Databases and Multi-Media Search, 1997:51-58.
- [23] Adamek T, O'Connor N E. A multiscale representation method for nonrigid shapes with a single closed contour [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004,14(5):742-753.
- [24] Donoser M, Riemenschneider H, Bischof H. Efficient partial shape matching of outer contours[C]// Asian Conference on Computer Vision. Springer-Verlag, 2009:281-292.
- [25] Vlachos M, Kollios G, Gunopulos D. Discovering similar multidimensional trajectories[C]//Data Engineering, 2002. Proceedings. 18th International Conference on. IEEE, 2002: 673-684.
- [26] Bruns T, Egenhofer M. Similarity of spatial scenes[C]// Seventh international symposium on spatial data handling. Delft, The Netherlands, 1996: 31-42.
- [27] 龚健雅,李小龙,吴华意. 实时GIS时空数据模型[J]. 测绘学报, 2014,43(3):226-232. [ Gong J Y, Li X L, Wu H Y. Spatiotemporal data model for real-time GIS[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 2014,43(3):226-232. ]
- [28] 段晓旗,刘涛,武丹. 基于层次分析法的多尺度点群目标相似度计算[J]. 地球信息科学学报, 2016,18(10):1312-1321. [ Duan X Q, Liu T, Wu D. Spatial similarity assessment of point clusters in multi-scale map spaces based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(10):1312-1321. ]
- [29] 张尧,樊红,黄旺. 基于Delaunay三角网的等高线树生成方法[J]. 测绘学报, 2012,41(3):461-467. [ Zhang Y, Fan H, Huang W. The method of generating contour tree based on contour Delaunay triangulation[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 2012,41(3):461-467. ]