

文章编号: 1007-4619(2007)02-0145-07

# 基于网络模型的等高线群拓扑关系表示

吴 凡<sup>1</sup>, 粟卫民<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学 地图科学与地理信息工程系 地理信息系统教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 湖南地图出版社, 湖南 长沙 410007)

**摘 要:** 等高线群拓扑关系的提取和表示是基于等高线的空间推理和地形特征挖掘的关键。在顾及地形特征的基础上, 本文提出了一种拓扑关系网络来组织地理目标之间的拓扑关系, 并进而提出分区二叉树、增量等高线树、等高线拓扑关系网三种拓扑关系网络来组织含未封闭等高线的复杂等高线群的拓扑关系, 从而从根本上解决了等高线群的侧向不连续性, 使基于等高线的空间推理更加简便和准确。

**关键词:** 知识表示; 拓扑关系; 等高线群; 地貌; 网络模型

**中图分类号:** P208 **文献标识码:** A

## The Representation of Topological Relations of Contour Groups Based on a Network Model

WU Fan<sup>1</sup>, SU Weimin<sup>1,2</sup>

(1. Department of Mapping and Geographical Information Engineering, Key Laboratory of Geographical Information System of Ministry of Education of China, Wuhan Hubei 430079, China; 2. Hunan Map Press, Hunan Changsha 410007, China)

**Abstract** The key of automated reasoning and extraction of terrain features with contour maps is the mining and description of topologic relations among contour lines. This paper suggests the networks of topologic relations (NTR) to describe the topologic relations among geographical objects, and three kinds of NTRs named the binary subdivision tree (BST), the incremental contour tree (ICT) and the networks of topologic relations of contour lines (NTRC) are presented to express the topologic relations among complicated contour groups having unclosed contour lines. These models have ultimately dealt with the lateral uncontinuity of contour lines and make the automated reasoning with contour maps more easily and exactly.

**Key words** knowledge representation; topologic relation; contour groups; geomorphology; network model

## 1 引 言

地貌数据一直是 GIS 管理和应用的重要数据来源。由于历史的原因, 所掌握的地貌数据主要是等高线, 而建立 DEM 的主要数据来源也是等高线。因此, 如何充分高效地利用等高线数据一直以来都是

地学学者们研究的热点。但是, 使用概略的线群模式来表达地貌曲面, 等高线具有侧向不连续性的缺点。地图读者解决这种不连续性问题的过程一般是: 先通过人的认知和地理学知识把握等高线的拓扑空间关系, 再根据等高线的高程在脑海中把等高线抽象成连续的空间曲面, 从而建立地形的心象地图。而对于计算机来说, 恰恰是缺少了人的认知能

收稿日期: 2005-04-07; 修订日期: 2006-01-23

基金项目: 国家基础测绘科技计划资助项目 (编号: 1469990324231); 国家自然科学基金资助项目 (编号: 40571135)。

**作者简介:** 吴凡, 1994-10-08 生, 工学博士, 武汉大学资源与环境科学学院; 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室教授、博士生导师。现从事地理空间数据的多尺度表达、地图自动综合、智能化地理计算、空间数据基础设施 (SDI) 建设与服务、遥感应用以及数字海洋等方面的研究。已发表论文 30 余篇, 出版专著 1 部。E-mail: drwu@263.net

力,不能把握拓空间关系。因此,必须在计算机中显式地表达等高线之间的拓空间关系,使等高线数据从松散耦合到结构化<sup>[1]</sup>,才能跨越不连续与连续的鸿沟。同时,一旦具有了这种对地貌整体结构的认知,计算机就能像人一样智能化地表达和处理地貌数据,进行空间推理和地形特征挖掘。

## 2 拓扑关系网络

拓扑关系是空间目标在拓扑变换下保持不变的空间关系<sup>[2]</sup>。它是空间数据模型的核心问题,是空间数据组织、查询和推理的基础。现有的 GIS 系统中对拓扑关系的表达有两种模式,一种是基于栅格模型的隐含模式,其拓扑关系由栅格的邻近性和栅格之间的距离隐含表达;一种是基于矢量模型的显式模式,其拓扑关系通过字段和指针显式存储。这种方式很容易跟常规的矢量 GIS 系统集成。如果基于矢量模型的显式模式,用结点表示空间物体,用连接结点的有向边表示空间物体之间的拓扑关系,则得到的有向图就称为拓扑关系网络,它的形式化定义如下:

**定义 1:** (拓扑关系网络)

$$N = (V, E)$$

$$V = \{v_i \mid v_i \in \text{spatial objects}\}$$

$$E = \{(v_i, v_j, \text{property}) \mid v_i, v_j \in V \wedge L(v_i, v_j) \wedge \text{property} \in P\}$$

$$P = \{p_i \mid p_i \in \text{topological relations}\}$$

其中, N 表示拓扑关系网络, V 是结点 (表示空间物体) 的集合, E 是 N 中边 (表示拓扑关系) 的集合。集合 E 的每一个元素用一个三元组 (v<sub>i</sub>, v<sub>j</sub>, property) 表示, L(v<sub>i</sub>, v<sub>j</sub>) 表示 v<sub>i</sub> 和 v<sub>j</sub> 存在显式表示的拓扑关系, property 表示拓扑关系类型,它是 P 的一个元素, P 包含所有的拓扑关系。P 的设置与系统要表示拓扑关系的详略程度有关,可以自己设定一个集合,也可以采用“四交模型”或者“九交模型”所表达的拓扑关系<sup>[2,3]</sup>。

一个简单的拓扑关系网络例子如图 1 所示。

利用拓扑关系网络来描述矢量数据的拓扑关系,具有以下优点: (1) 向下兼容以前的矢量模型; (2) 把拓扑关系网络的每个结点都看作对象就可与面向对象系统集成; (3) 基于网络模型,易于进行空间拓扑关系推理。

本文利用拓扑关系网络来组织等高线,实现等高线数据从离散到连续的跨越,从而使计算机能够基于等高线智能化、一览性地进行空间推理<sup>[4]</sup>和地

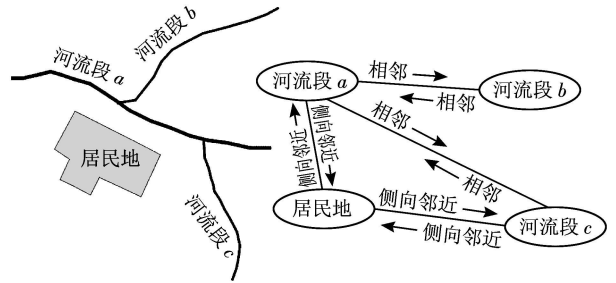


图 1 多个地理目标的拓扑关系网络

Fig 1 The NTR of several spatial objects

形特征的自动提取。

## 3 以往研究回顾

对等高线拓扑关系的研究<sup>[4-11]</sup>主要集中在根据等高线图形之间的关系来建立起某种树结构,以表达等高线之间的拓空间关系。已有的等高线树可分为以下两类<sup>[6]</sup>: (1) 把等高线映射为树中的边,等高线之间的区域映射为树中的结点,由 Boyell 和 Reston 在 1963 年提出; (2) 把等高线映射为树中结点,等高线之间的区域映射为树的边,由 Freeman 和 Morse 在 1967 年提出。图 2 等高线对应的等高线树如图 3 所示。

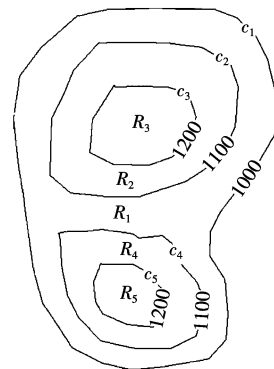


图 2 示例等高线

Fig 2 Sample contour lines

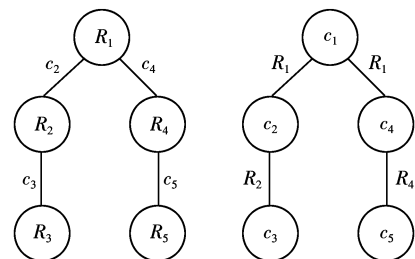


图 3 根据图 2 等高线建立的两种不同等高线树

Fig 3 Two different kinds of contour trees

从图 3 可以看到,这两种等高线树在表达等高线拓空间关系时,都存在一定的缺陷。对于第一种树来说,首先,从图上可以看出,存在等高线( $c_1$ )没有相应的边来表达;其次,它只适用于区域扩张法<sup>[5]</sup>来求等高线所围区域之间的邻近关系,而对于一般应用来说,只有矢量等高线数据,要先转换成栅格形式比较烦杂。对于第二种等高线树来说,存在区域没有表达( $R_3, R_5$ )和区域( $R_1$ )与边不——对应的现象。更重要的是,两种等高线都没有考虑局部地形特征,所以没有从根本上解决等高线侧向不连续和基于等高线的空间推理<sup>[4]</sup>问题。

## 4 等高线群拓扑关系网络

### 4.1 等高线群的几种拓扑关系

自然地貌是一个复杂的三维曲面,它又由一系列小地貌(如山头、洼地、鞍部、山脊、山谷、坡地等)组成。这些小地貌之间存在拓扑邻近关系。由于等高线能够保持地貌曲面的拓扑性质,所以这些小地貌的拓扑邻近关系在等高线上就表现为以下几种拓扑关系:

- (1) 未闭合等高线与相邻等高线(闭合或未闭合)的侧向邻近关系;
- (2) 相邻闭合等高线之间的包围关系(对应山头、洼地、坡地地貌);
- (3) 相邻闭合等高线之间的并列关系(对应鞍部地貌);
- (4) 同一等高线相邻段之间的邻近关系(对应山脊、山谷地貌),如图 4 中 OA 和 OB 段所示;
- (5) 等高线与所围区域之间的包围关系。

这几种拓扑关系的提取方法<sup>[5-9,12]</sup>主要有:

- (1) 栅格区域扩张法<sup>[6]</sup>,即从一条等高线的任意一个栅格点出发,如果通过区域扩张算法能够达

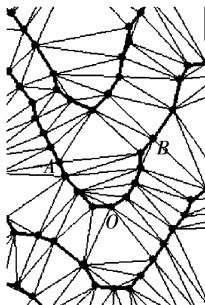


图 4 同一等高线相邻段之间的邻近关系

Fig 4 Lateral adjacent relations between two segments in the same contour line

到另一条等高线,则这两条等高线邻近;

- (2) 高程邻近法,即高程只相差一个等高线距的等高线可能邻近,这种方法虽然不完备,但判断速度最快;

- (3) 边界交点排序法<sup>[12]</sup>,即先求出未封闭等高线与图廓边的交点,然后将这些交点沿着图廓边按顺时针或逆时针排序,就可以得到未封闭等高线的相邻关系。这是求未封闭等高线侧向邻近关系的较快方法;

- (4) 约束 Delaunay 三角网法,把等高线作为约束边构建约束 Delaunay 三角网,就能得到各等高线的邻近关系,这是现在用得较多的方法;

- (5) Voronoi 图法,它是约束 Delaunay 三角网法的对偶;

- (6) 点与多边形关系探测法<sup>[8]</sup>,由于等高线不相交,对于封闭等高线,只要判断另一条等高线上的任意一点是否在这条封闭等高线形成的多边形内,就能判断另一等高线是否包围在此封闭等高线内。

在实际应用中,要综合利用这 6 种方法来获得上述等高线群的所有拓扑关系,进而得到等高线群的拓扑关系网。

### 4.2 未闭合等高线的拓扑关系及等高线图分区

#### 4.2.1 分区二叉树的定义

对于未闭合等高线,需要提取和表达的主要是它与其他等高线的侧向邻近关系<sup>[13]</sup>。对于这种侧向邻近关系,用一种分区二叉树来表达。创建分区二叉树的额外回报就是可以构造一种提取地性线的分治的算法,从而提高算法的效率。下面给出分区二叉树的形式化定义:

**定义 2:** (分区二叉树)

分区二叉树是  $n(n \geq 1)$  个有限分区的集合。当  $n=1$  时,此分区二叉树只包含一个代表全区的结点,称此树为初始分区二叉树。在一棵非初始分区二叉树( $n > 1$ )中:

- (1) 包含一个代表全区的根结点;

- (2) 根结点分区被分成 2 个互不相交的分区集合  $BST_1$  和  $BST_2$ , 其中每一个集合  $BST_i (1 \leq i \leq 2)$  本身又是一棵分区二叉树。树  $BST_1$  和  $BST_2$  称为根结点的子树。

在等高线图上,首先把等高线的边界作为根结点,代表的就是整个等高线图的区域。由于每条未封闭等高线都把这个区域剖分成两部分,因此,可以递归地插入所有的未封闭等高线,每插入一条,就把

它所在的区域剖分成两个子区域,这样就得到一个分区二叉树。图 5 是一幅简单等高线地图示例,其分区及分区二叉树如图 6 和图 7 所示。要注意的是,图 8 采用所有等高线的凸壳作为根分区,这使得分区二叉树也适用于没有接边的等高线,如果在预处理中对等高线进行接边的话,也可以采用区域的最小包围矩形 (MBR) 作为根分区。

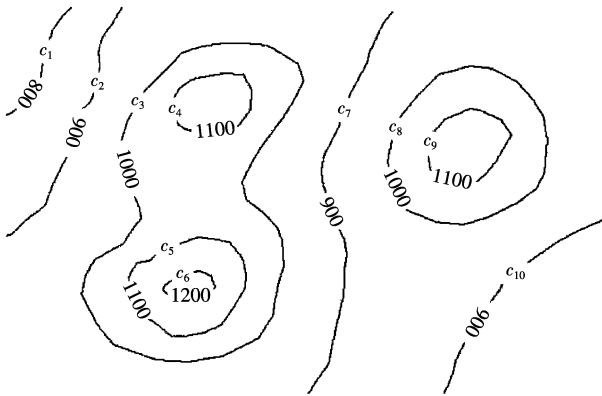


图 5 另一简单示例等高线图

Fig 5 Another simple contour map

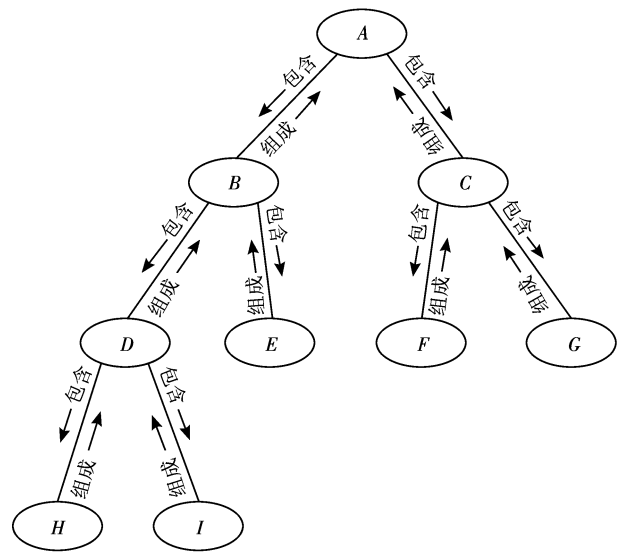


图 7 图 5 的分区二叉树

Fig 7 Figure 5's BST

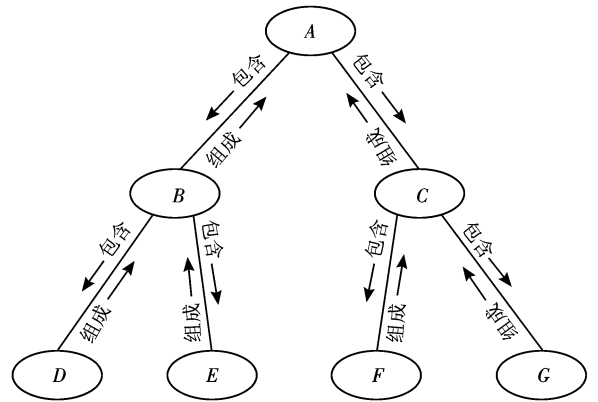


图 8 受限深度为 2 的分区二叉树

Fig 8 The BST whose depth boundary is 2

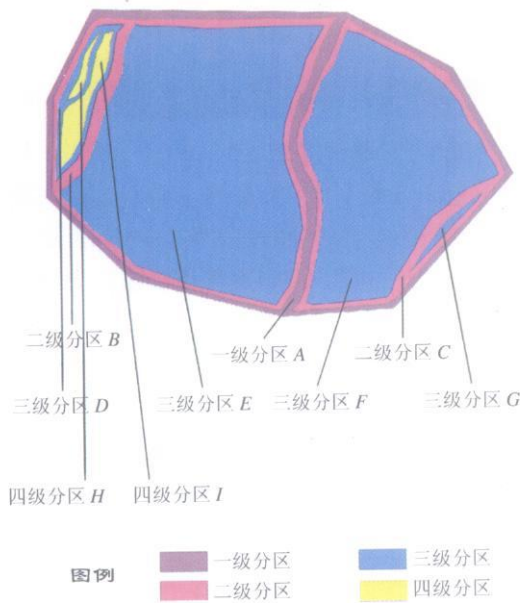


图 6 图 5 的分区

Fig 6 Figure 5's subdivision

### 4.2.2 分区二叉树的性质

分区二叉树具有下列性质:

(1) 分区二叉树的叶子结点代表一个以未封闭等高线和凸壳边为边界,不含有其他未封闭等高线(间曲线除外)的区域;

(2) 所有的叶子结点的总和就是整个凸壳,即

等高线图区域;

(3) 分区二叉树具有 LOD (Level of Detail) 的性质,以任意一个深度为界,小于这一深度层能组成另一个完整的分区树。如以深度 2 为界,图 7 的分区二叉树变为图 8。

正是分区二叉树的这些优异性质使基于它的算法可具有分治和并行的特性。

## 4.3 闭合等高线的拓扑关系

### 4.3.1 增量等高线树的定义

如前所述,闭合等高线的拓扑关系主要有相邻闭合等高线之间的包围关系、相邻闭合等高线之间的并列关系、等高线与所围区域之间的包围关系。前述的等高线树虽然已经基本上表达了这几种关系,但由于没考虑局部地形特征,所以并没有从根本

上解决等高线的侧向不连续性问题,这就给基于等高线的空间推理带来很多麻烦。因此,在顾及地貌特征的基础上提出增量等高线树来描述等高线及等高线所围区域之间的空间拓扑关系。在提出增量等高线树之前,先给出各地形特征等高线的定义。

**定义 3:** (鞍部特征等高线)

设有三条彼此相邻的闭合等高线  $c_1$ ,  $c_2$  和  $c_3$ , 如图 9 所示。其中,  $c_1$  与  $c_2$  和  $c_3$  之间的拓扑空间关系为包围关系,  $c_2$  与  $c_3$  为并列关系, 则在  $c_1$  与  $c_2$  和  $c_3$  之间的区域存在鞍部。而在鞍部区域中, 存在一条通过鞍部特征点  $S$  隐含的自相交等高线  $s_1$ , 则称  $s_1$  为鞍部特征等高线。

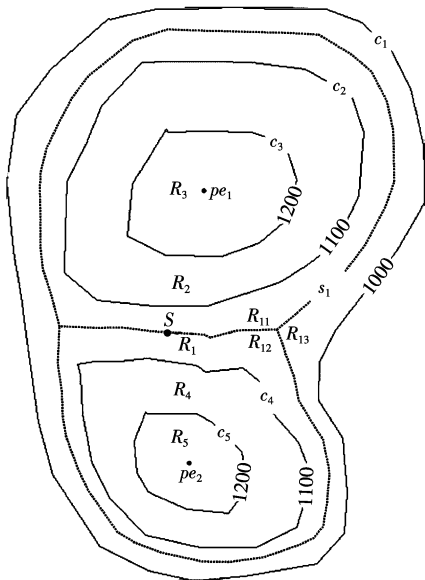


图 9 地形特征等高线

Fig 9 The saddle contour line

**定义 4:** (山头特征等高线与洼地特征等高线)

在一组表达山头地形特征的局部等高线图  $c_1, c_2, \dots, c_n$  ( $n \geq 2$ ) 中, 总存在一条高程最高的等高线  $c_m$ , 并且它不再包围其他的等高线。那么, 在等高线  $c_m$  内, 存在一个山头点  $pe$  (假设山头不是平地), 由于点也可以看作退化的线, 所以把这个山头点称为山头特征等高线。同理, 把洼地点称为洼地特征等高线。图 9 中的  $pe_1$  和  $pe_2$  就是山头特征等高线。

下面给出增量等高线树的定义。

**定义 5:** (增量等高线树)

为了更明确地表达不同等高线之间、等高线与区域之间的拓扑关系, 在原始等高线集  $c_0$  的基础上增加若干条内插的辅助等高线  $c_1$  ( $c_1$  称为增量等高线集, 一般为表达地形特征的等高线, 最终出图时不

绘制), 则称根据等高线集  $c_2 = c_0 + c_1$  形成的等高线树  $T$  为增量等高线树。

如果把鞍部、山头和洼地地形特征作为增量等高线加入原始等高线集中, 就可得到一种顾及地形特征的增量等高线树, 称为地形特征增量等高线树, 图 10 为图 2 的地形特征增量等高线树。

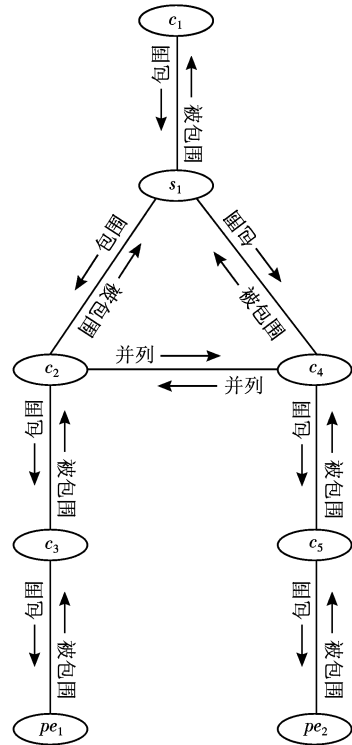


图 10 图 2 的地形特征增量等高线树

Fig 10 The terrain feature incremental contour tree of Fig 2

**4.3.2 地形特征增量等高线树的性质**

(1) 树的一个节点对应一条等高线, 连接树节点之间的弧对应于等高线相邻的区域。在图 10 中, 节点  $c_1, s_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  分别对应于等高线  $c_1, s_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ ;  $c_1, s_1$  之间的弧对应于  $R_1$  被划分后的区域  $R_{13}$ ;  $s_1, c_2$  之间的弧对应于  $R_1$  被划分后的区域  $R_{11}$ ;  $s_1, c_3$  之间的弧对应于  $R_1$  被划分后的区域  $R_{12}$ ; 其他弧段类似。

(2) 树的父子节点关系对应相邻等高线的拓扑包围关系, 树的兄弟节点关系对应相邻等高线的拓扑并列关系。节点与弧的邻接关系对应等高线与区域的邻接关系。

(3) 由于树的两个节点之间只存在惟一的弧, 所以任意一个区域只被两条等高线包围, 这在图 10 中也能得到证明。

(4) 节点度 (不计算表示并列关系的弧段) 对



- [ 6 ] Liu X, Rameriz J R. Automated Vectorization and Labeling of Very Large Hypsographic Map Images Using Contour Graph[ J]. Surveying and Land Information Systems, 1997, 57(1): 5- 10.
- [ 7 ] Wang T. Formalization and Applications of Topological Relation of Contour Lines[ A]. Proceedings of the XX th ISPRS Congress [ C]. Istanbul, Turkey, Commission 4, 2004.
- [ 8 ] Qiao C F, Chen J, Zhao R L. Generation of Contour Tree Based on CVC [ A ]. International Conference on Geoinformatics & Geographical Systems Modeling and Fifth Beijing International Workshop in GIS[ C]. Beijing, PR China, 2004.
- [ 9 ] Wu H H. The Automatically Building and Application of Contour Tree[ J]. Technology Trends of Surveying and Mapping, 1996, (1): 2- 7. [ 毋河海. 等高线树的自动建立及其应用 [ J]. 测绘科技动态, 1996, (1): 2- 7. ]
- [ 10 ] M. de Berg, M. van Kreveld. Trekking in the Alps Without Freezing or Getting Tired [ J]. Algorithmica, 1997, 18(3): 306- 323.
- [ 11 ] Robert L. Griffith. Three Principles of Representation for Semantic Networks[ J]. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 1982, 7(3): 417- 442.
- [ 12 ] Wu Z Y, Gao J Y. A Fast Algorithm of Color Fill between Contours Based on Grid Data [ J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(4): 350- 354. [ 吴自银, 高金耀. 一种基于格网的快速等值线充填算法 [ J]. 测绘学报, 1999, 28(4): 350- 354. ]
- [ 13 ] Su W M, Wu F. Research on Constructing Contours from Regular Terrain Grids Containing Invalid Data [ J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 14(2): 138- 142.