



武漢大學  
WUHAN UNIVERSITY

求是拓新 自強弘毅  
WUHAN UNIVERSITY



# 等高线层次结构与地形特征线 的提取或推理





# 基于规则建立等高线层次结构

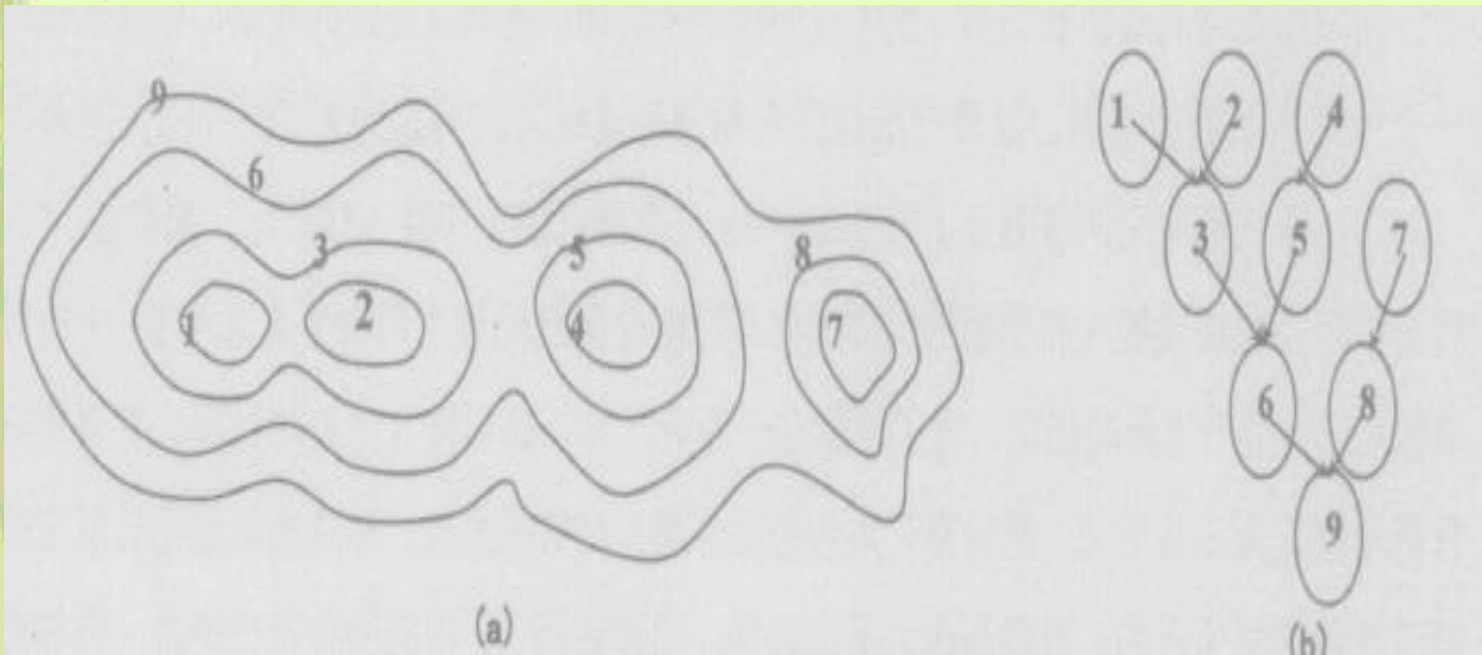
## 前提条件：

- 若将等高线视为线目标，则等高线拓扑关系只有一种相离关系；若将等高线视为面对象的边界，则等高线拓扑关系分为两种：包含和相离关系。
- 这里，将等高线视为面对象的边界。



# 基于规则建立等高线层次结构

**基本原理：** 将等高线作为树结构中的节点，把高程最高的等高线作为树的根节点，如果两根等高线在图中相邻，则在对应的节点之间建立父子或并列关系。



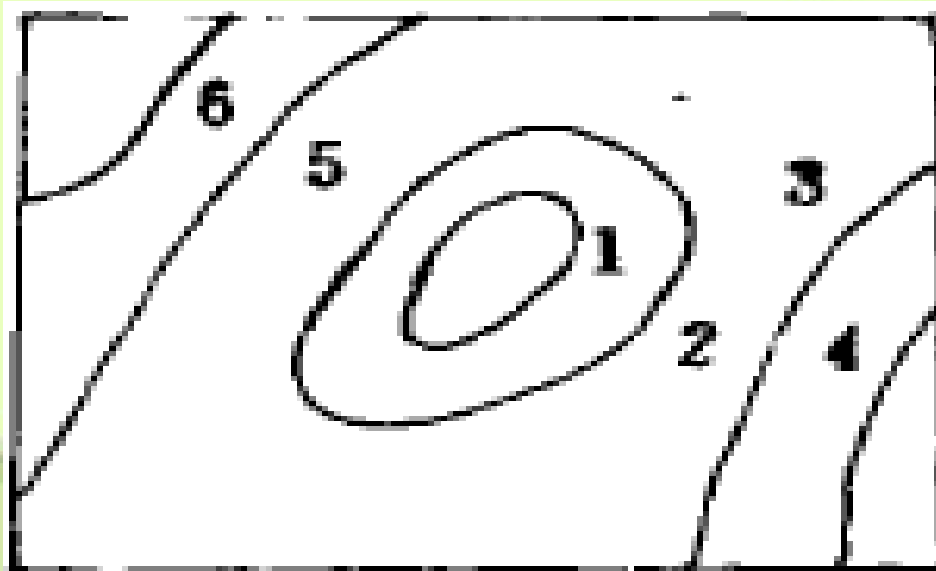




# 基于规则建立等高线层次结构

**现实情形：**因图幅的范围所限会产生等高线不自封闭的情形。

大多数情况下，有限的二维制图区域内会产生开曲线（见图中3、4、5、6），那么，如何将截断的那部分等高线闭合起来？





# 基于规则建立等高线层次结构

## 两个假设：

其一：等高线在图幅内不间断。为了满足此条件，可把间断等高线连接起来，有时还需要把一幅图看成是几幅图。

其二：当一个区域的等高线被多边形裁剪时，认为**同高、相邻、不封闭**的等高线组可封闭。





# 基于规则建立等高线层次结构

## 一些基本规则：

等高线描述地形必须遵循一些规则，正是这些规则使得空间关系能够自动推理。例如：

- 1、若等高线以逆时针方向存储，高程为 $H$ ，其位于高程为 $H - \Delta H$ 的等高线的封闭区域中，那么等高线左邻域的高程比等高线的高程高，右邻域的高程比等高线的高程低；
- 2、若等高线以逆时针方向存储，高程为 $H$ ，其位于高程为 $H + \Delta H$ 的等高线的封闭区域中，那么等高线左邻域的高程比等高线的高程低，右邻域的高程比等高线的高程高。
- 3、等高线因为分幅等原因，出现开曲线式等高线，若高程为 $H$ 的开曲线式等高线有 $N$ 段，其和图幅边线可构造封闭多边形，封闭多边形内不会有高程为 $H$ 的开曲线式等高线，以虚拟等高线的自封闭性。

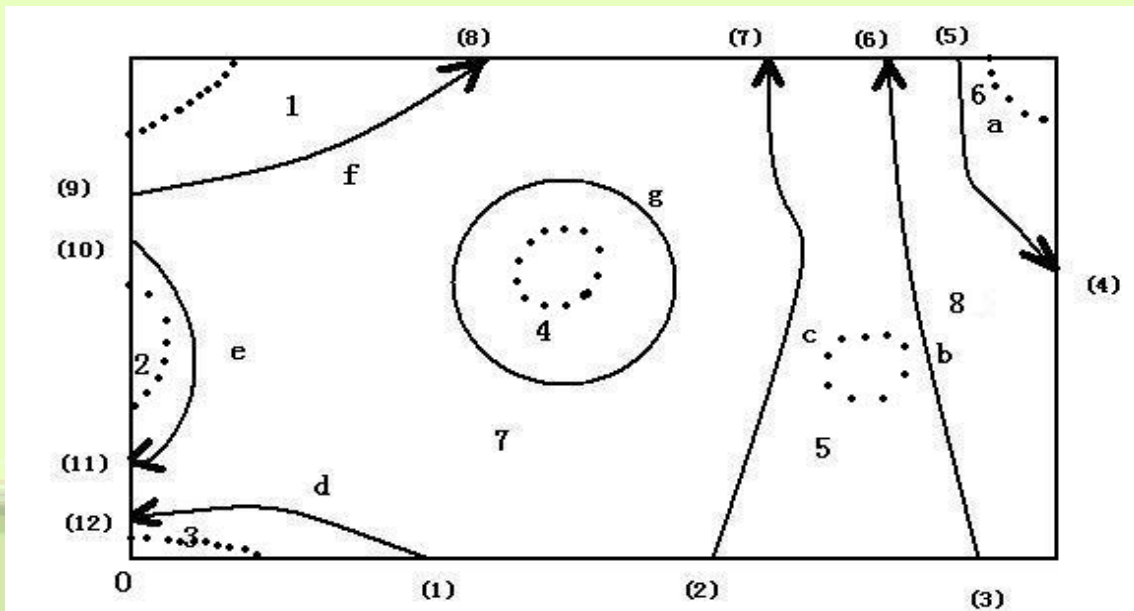
.....



# 建立等高线层次结构的过程

## 一、建立等高线自封闭多边形

- (1) 选择一个高程值的等高线集合。以图框上的各段边为准建立多边形。（注意：图框上每条边只能使用一次）。
- (2) 如下图所示，不封闭的等高线与图框交点有12个。可以构造出12条边，例如：D1 (1)-(2) .....
- (3) 对于第一条边D1而言，按逆时针方向，可以找到c、D7、-f、D9、e、D11、-d这个多边形。以此类推，有如图所示的8个多边形。



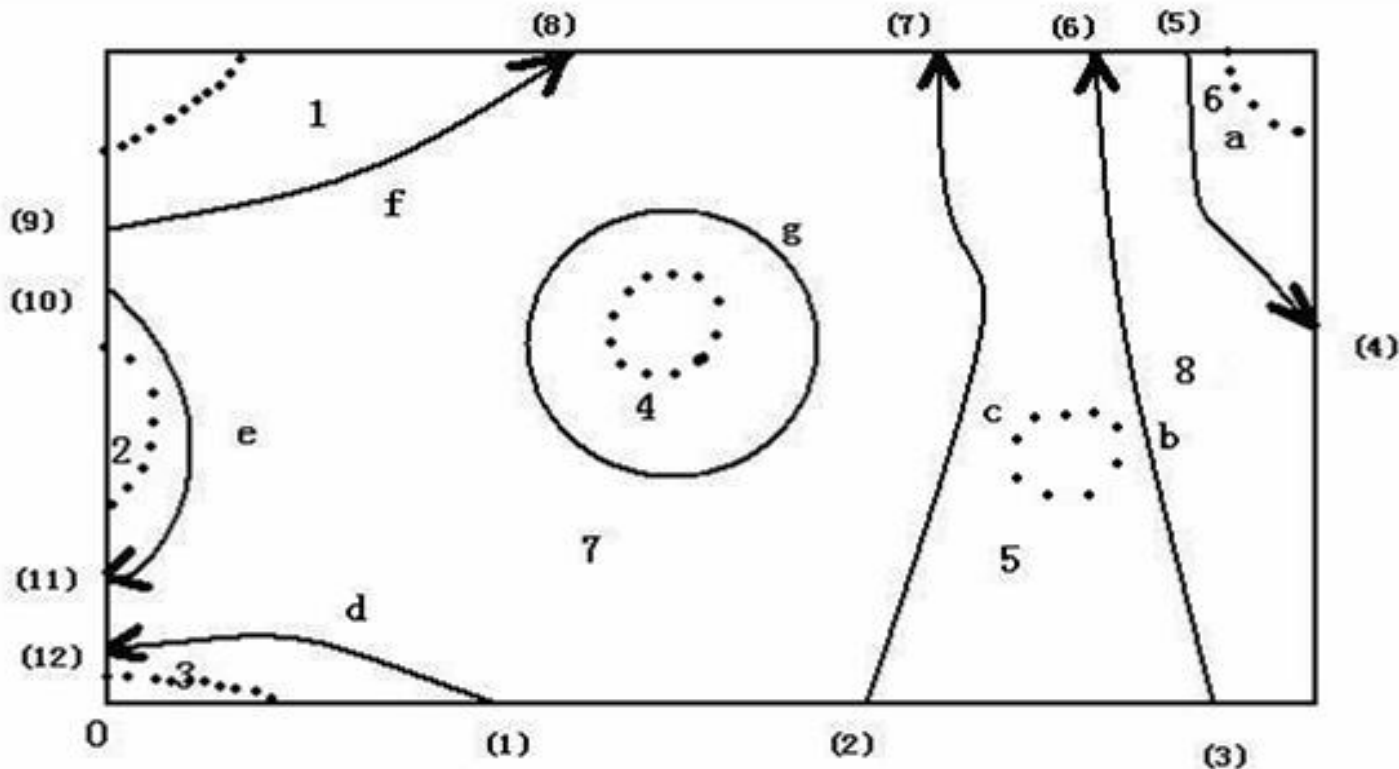




# 建立等高线层次结构的过程

## (4) 删除不合理的多边形

根据前面定义的规则，判断哪些多边形不合理。按照规则，**多边形7（包含了相同高程的等高线）和8（中间无高程更高的等高线）**应该删除。随后，处理下一个高程值的等高线







# 建立等高线层次结构的过程

## 二、调整等高线方向

数字化后，等高线方向不一致，必须做进一步调整。按**左高右低的原则**对等高线的走向进行调整。

**三、构建树层次结构** 可以判断每个多边形是否包含了高程值比它高的等高线，包含了多少根。一条等高线至少和另一条等高线有关系。若把一条等高线看成是一个结点，那么在树结点上，除了根结点和叶结点外，一条等高线至少和两个节点有关系，一个父结点一个子结点。根据这些原则和已经形成的等高线的自封闭关系，就可以构建一个等高线的树结构图。

多边形号组成：等高线层号+多边形生成顺序号。



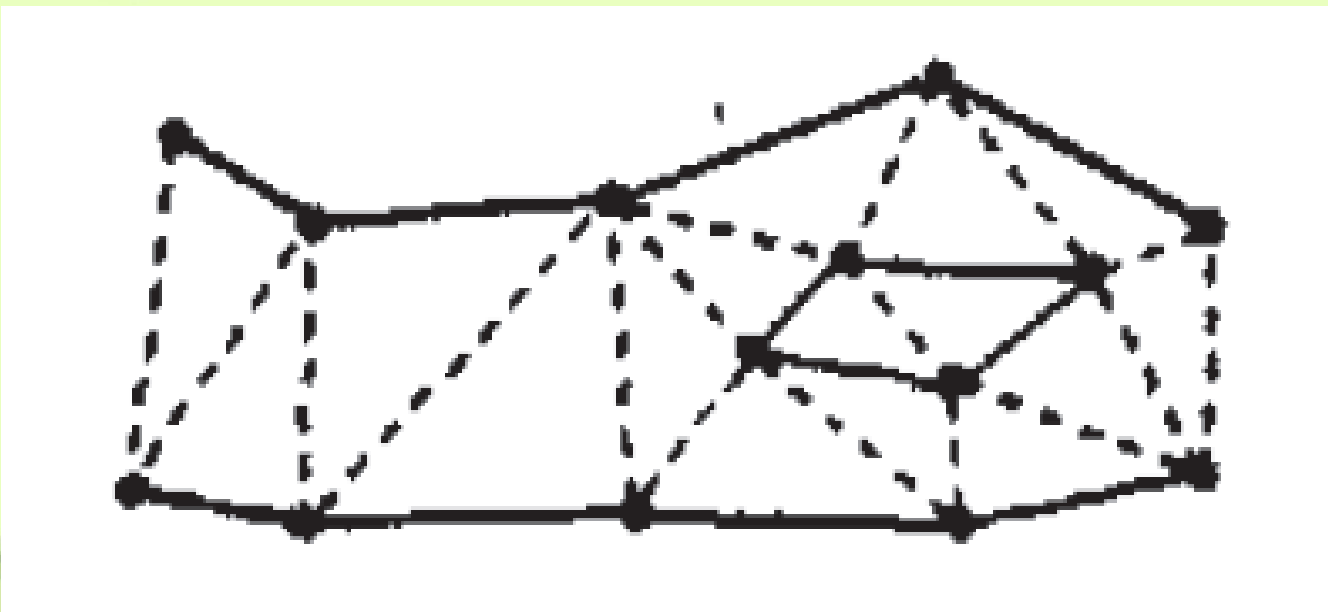
# 基于约束性三角网建立等高线层次结构

- 1) 约束性三角网的建立及边的分类
- 2) 等高线层次结构的建立
- 3) 等高线走向的调整



# 约束性De launay三角网的建立

三角形的边直接表达了等高线之间的邻近关系，常见的这种三角网如下图所示：



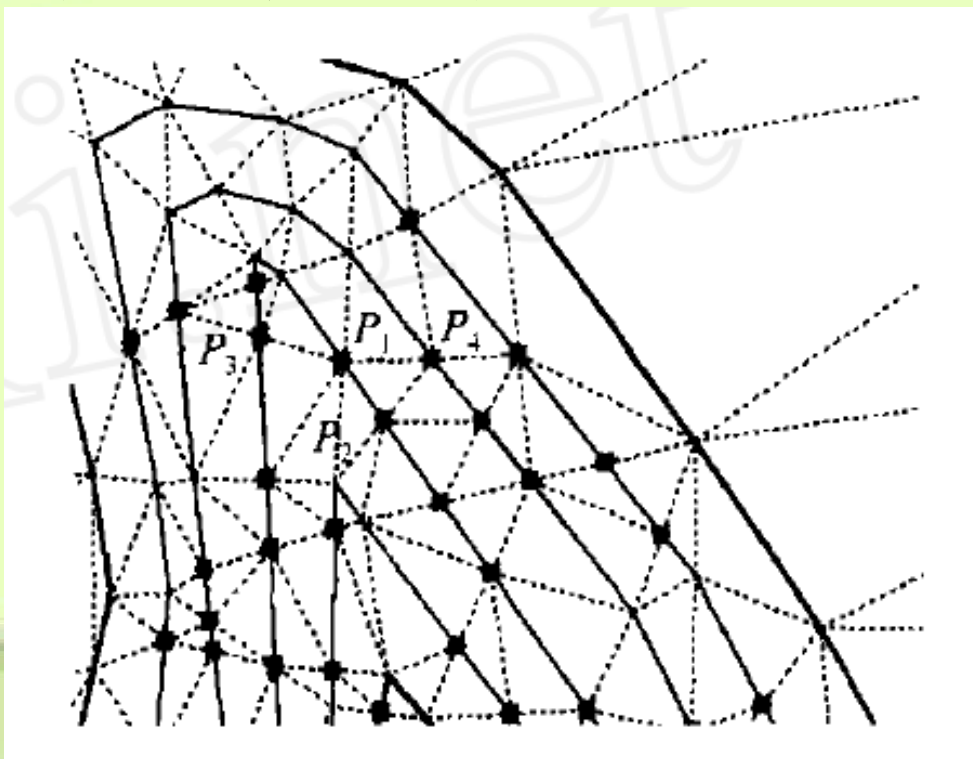




# 三角网中边的分类

边的类型可由端点位置和高程决定

已经记录的信息包括：边的两个端点为 $P_1$ 和 $P_2$  高程为 $H_1$ 和 $H_2$ ；所在的等高线的关键字为 $KEY(P_1)$ 和 $KEY(P_2)$ ；所在的等高线的对应顶点的序号分别为 $LIST(P_1)$ 和 $LIST(P_2)$





# 三角网中边的分类

类别	数学描述	解释
A1	$KEY(P_1) = KEY(P_2) \in C$ $ LIST(P_1) - LIST(P_2)  = 1$	三角形边是一条等高线上的直线段, 并且是同一等高线上的相邻顶点
A2	$KEY(P_1) = KEY(P_2) \in C$ $ LIST(P_1) - LIST(P_2)  \neq 1$	平三角形的一条边。边的两个端点位于同一条等高线上, 但它们不是相邻顶点
A3	$KEY(P_1) \neq KEY(P_2) \quad H_1 = H_2$ $KEY(P_1) \in C \text{ and } KEY(P_2) \in C$	边的两个端点位于不同等高线上, 且高程相等
A4	$KEY(P_1) \neq KEY(P_2)$ $KEY(P_1) \in C \text{ and } KEY(P_2) \in C$ $ H_1 - H_2  = \Delta H (\text{等高距})$	边的两个端点位于不同等高线上, 且高程不想等, 高程差为一个等高距
A5	$KEY(P_1) \neq KEY(P_2)$ $KEY(P_1) \in C \text{ and } KEY(P_2) \in C$ $ H_1 - H_2  \neq \Delta H (\text{等高距})$	边的两个端点位于不同等高线上, 且高程不相等, 高程差不等于一个等高距
A6	$KEY(P_1) \neq KEY(P_2)$ $KEY(P_1) \notin C \text{ or } KEY(P_2) \notin C$	边的两个端点位于不同的线(或高程点)上。至多只有一个端点在等高线上
A7	$KEY(P_1) = KEY(P_2) \notin C$ $KEY(P_1) = N \text{ or } KEY(P_1) \in D$	边的两个端点位于同一条线(或高程点)上, 高程可以相等, 也可以不相等。这条线不是等高线



# 分类的含义

- A1和A2描述了同一条等高线，
- A7只是描述了同一条线(等高线、地形突变线和高程点)，

其他4种可以用于推理等高线、地形突变线和高程点之间的空间关系：

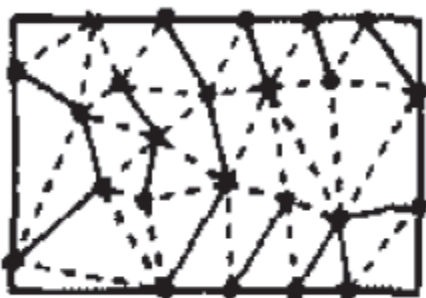
- A3类型的两个端点所在的等高线为并列(或相离)关系；
- A4和A5类型的两个端点所在的等高线为包含关系；
- 属于A6类型的情况较多，边的两个端点可能在不同的高程点上，可能在不同的地形突变线上，可能在某条线和一个高程点上，还可能分别在等高线和地形突变线上，不论属于哪种情况，两个端点所在的线(或点)是相邻近的。



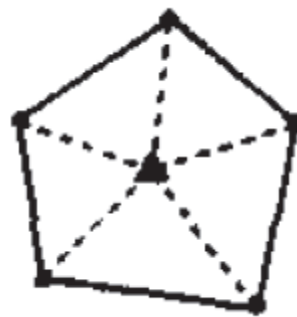


# 分类的含义

在地图上有时会出现“间曲线”、“地形突变线(例如,陡坎、冲沟等)”、高程点等反应地形变化的线和点,因此在建立等高线的层次结构树结构时把这些地理要素纳入所建立的结构中是很有用的。



出现了间曲线,  
三角形边的类型是A5

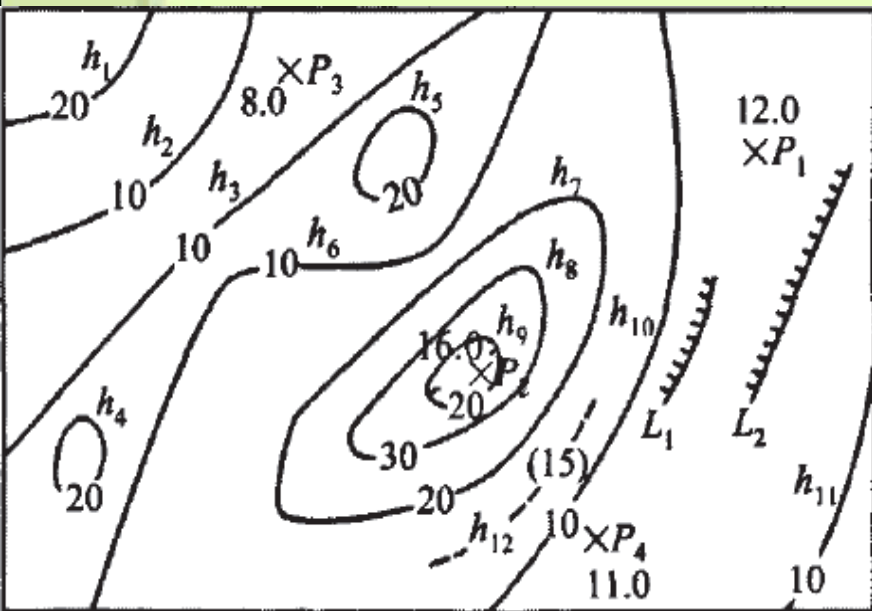


出现高程点,  
三角形边的类型是A6



# 建立等高线层次结构的步骤

- 1) 以等高线、高程点等为基础构建约束DT。
- 2) 按照高程对等高线和高程点从小到大的顺序进行排序，得到每个高程值所对应的等高线和高程点集合。然后顺序处理相应高程值的等高线。



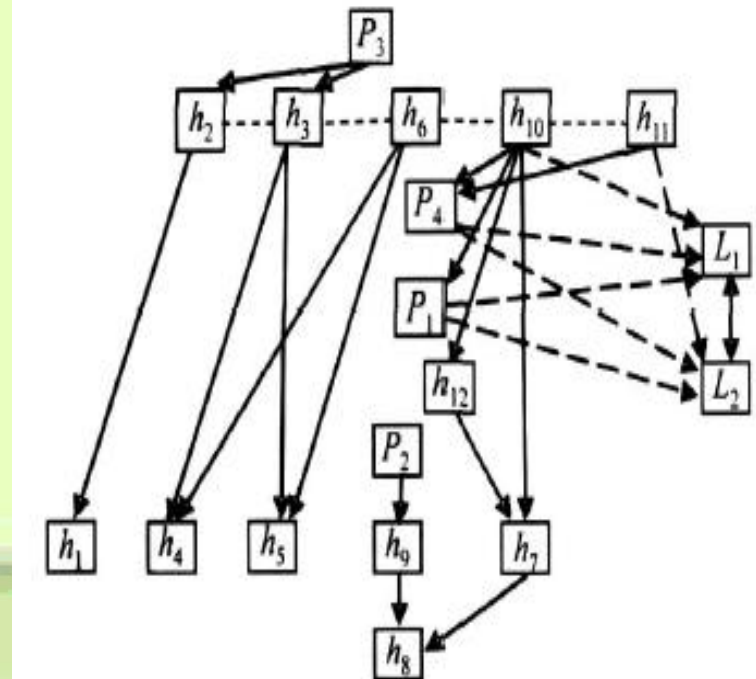




# 建立等高线层次结构的步骤

- 3) 若有A3类型，则边所关联的等高线为并列关系。
- 4) 若有A4或A5类型，则定义相关联的等高线为父子关系。
- 5) 若有A6类型，则定义相关联的等高线和高程点为并列关系或父子关系。
- 6) 重复这些步骤，处理完所有高程值。

序列	高程值	集合 $\{C_{ij}\}$
H <sub>1</sub>	8.0	P <sub>3</sub>
H <sub>2</sub>	10	h <sub>2</sub> , h <sub>3</sub> , h <sub>6</sub> , h <sub>10</sub> , h <sub>11</sub>
H <sub>3</sub>	11.0	P <sub>4</sub>
H <sub>4</sub>	12.0	P <sub>1</sub>
H <sub>5</sub>	15	h <sub>12</sub>
H <sub>6</sub>	16.0	P <sub>2</sub>
H <sub>7</sub>	20	h <sub>1</sub> , h <sub>4</sub> , h <sub>5</sub> , h <sub>7</sub> , h <sub>9</sub>
H <sub>8</sub>	30	h <sub>8</sub>





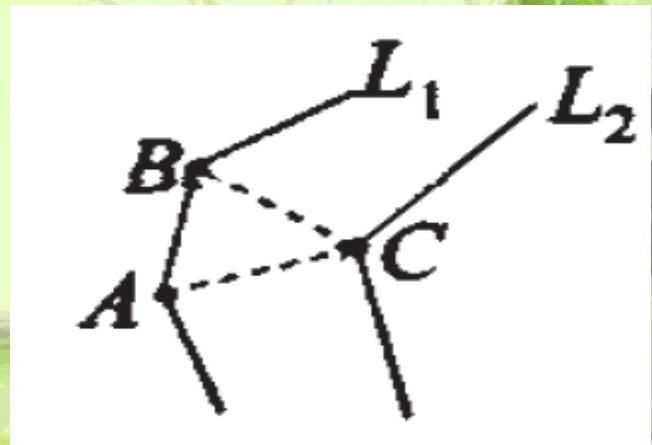


## 等高线走向的调整

数字化后的等高线的走向并不是统一的，这里借助等高线的层次结构来调整等高线的走向。

假设等高线的走向是左边高、右边低。

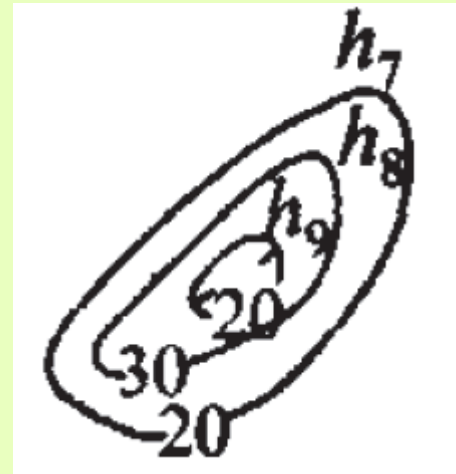
已知两条等高线( $L_1$ 和 $L_2$ )的高程，并且 $L_2$ 的高程比 $L_1$ 的高程高，从约束DT中可以找到一个 $\triangle ABC$ ，从A到B是等高线 $L_1$ 当前的走向，利用向量和的叉积判断点C位于等高线 $L_1$ 的右侧，所以等高线 $L_1$ 的右边高，这与规则相矛盾。因此，等高线 $L_1$ 的走向必须反向。当一条等高线是闭曲线，并且内部不包含其他高程点或等高线时，可以依据它与外围等高线的父子关系





## 等高线走向的调整

由于等高线的形态和空间分布是多种多样的，有时并不能判断等高线的走向，如下图所示的几条等高线的高程相等，由于信息不全，无法判断等高线的走向。



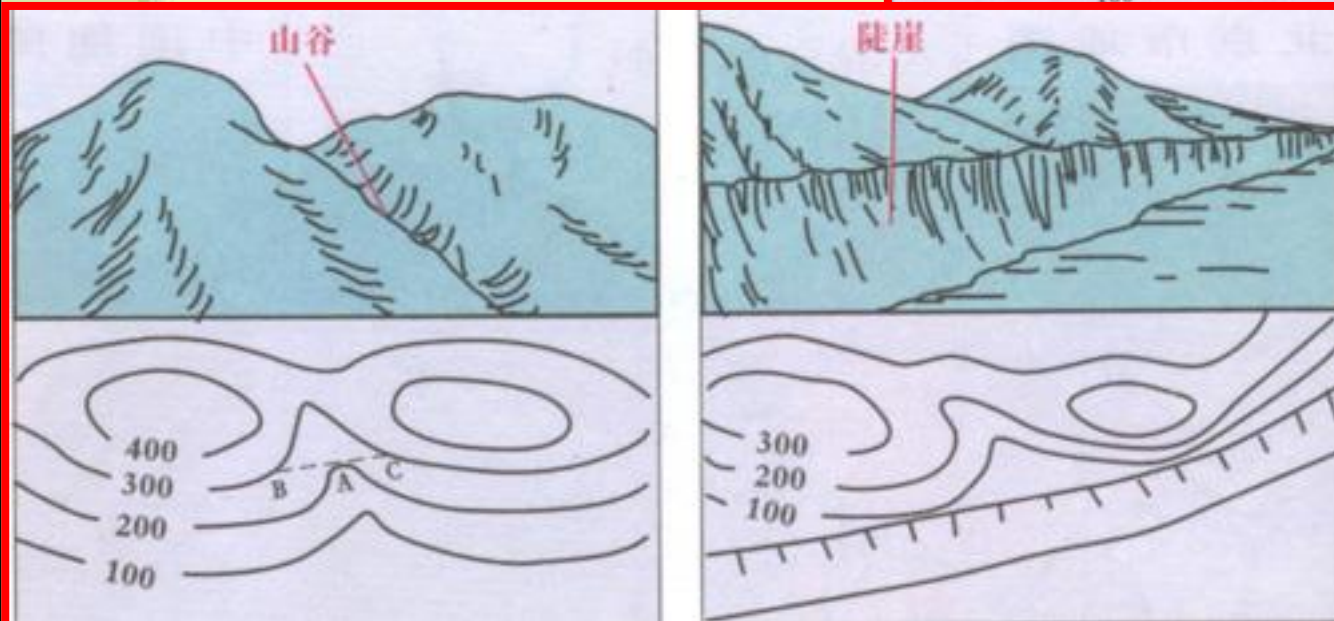
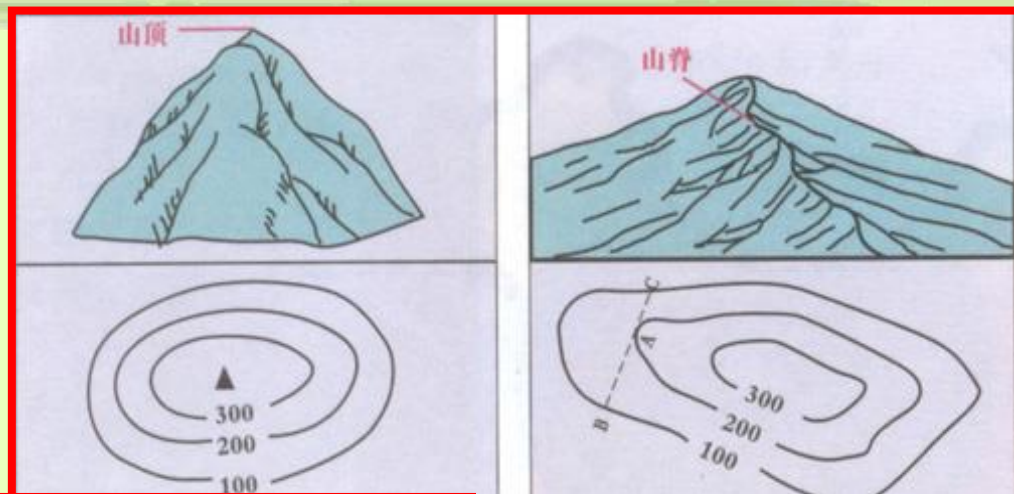
如果地貌特征呈漏斗状，并且在一种十分特殊的情况下，如右上图所示， $h_8$ 是火山口的边缘(几乎没有宽度)的最高处， $h_7$ 和 $h_9$ 都比 $h_8$ 的高程低，则 $h_8$ 的等高线的走向具有二义性。





# 基于等高线的地形特征提取

- 寻找特征点
- 生成特征线







# 寻找地形特征点

- Split方法的基本思想是先用曲线的最左边和最右边的两个点作为起始点(对于闭合曲线),将闭合曲线分为两部分,对于非闭合曲线选择其两个端点作为起始点。
- 起始点确定后,顺序计算曲线上位于两个起始点之间的每一个点距两个起始点连线的垂距,并找出其最大垂距点。

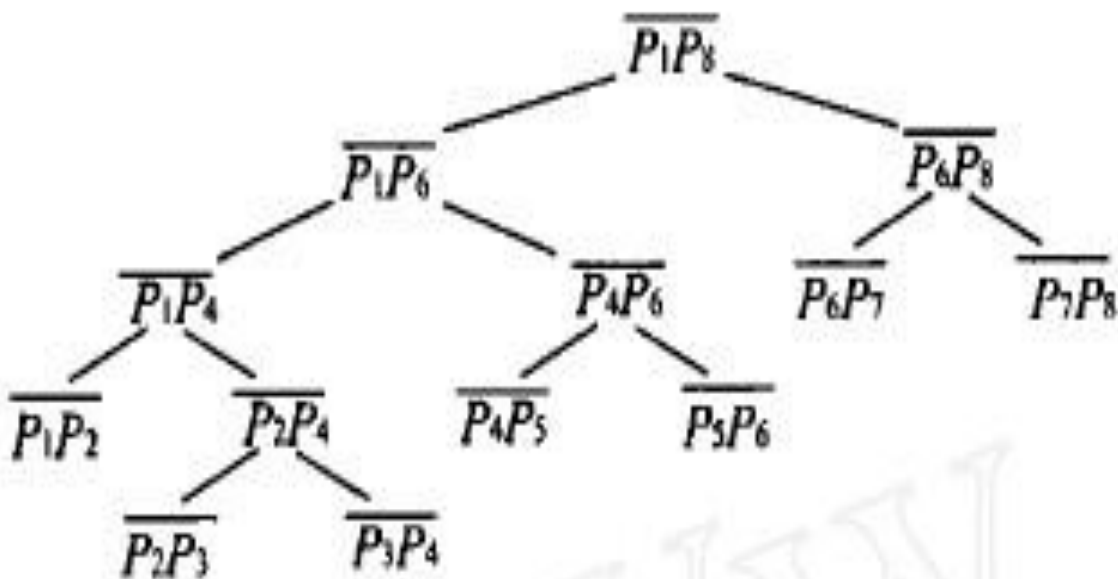
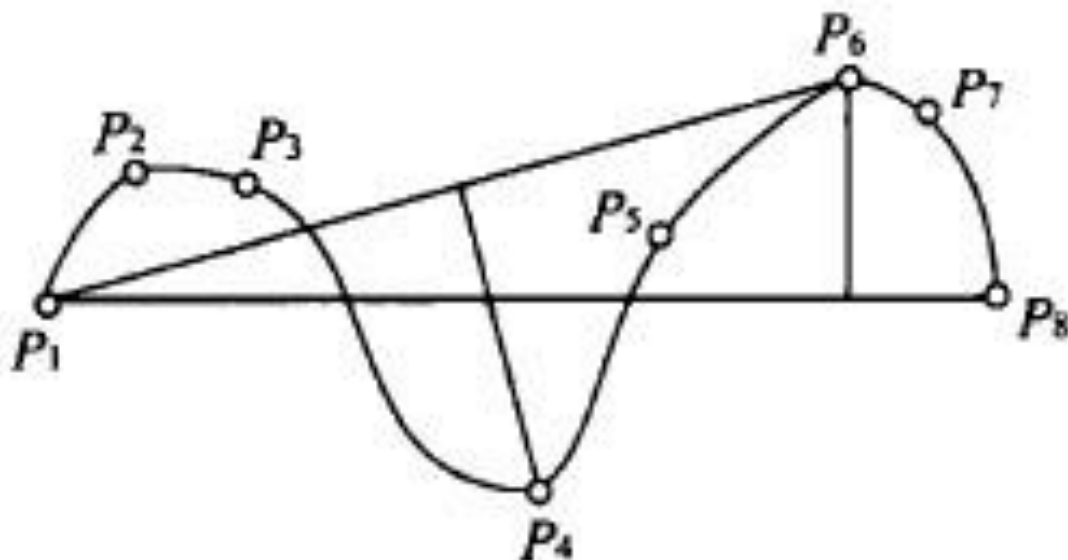


## 寻找地形特征点

- 若该点处等高线张角小于给定的**阈值** (如 **$165^\circ$** , 如果张角大于 $165^\circ$ , 则等高线在此处近似于直线, 弯曲变化小), 则该点为**特征点**。
- 它将原曲线分为两部分, 对每一部分确定新的**起始点**, 即用该点分别与原两个起始点构成两对新的起始点, 用相同的方法对这两段曲线找出各自的**特征点**。



# 寻找地形特征点







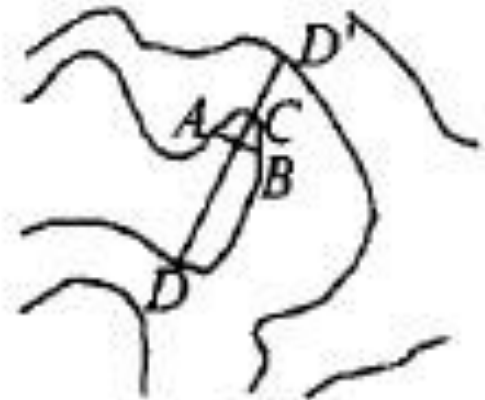
# 寻找地形特征线

生成山脊线、山谷线应遵循如下原则：

- 参考点与待判断点间的距离在一限值内；
- 待判断点与参考点的连线应处于等高线在参考点所张开的夹角内；
- 等高线在参考点与待判断点处的张角方向应基本相同；
- 山谷线、山脊线待判断点的转向角在一限值内。

应先对山脊点、山谷点按其高程值大小进行排序

若搜索到的山谷（山脊）线下一点已是别的山谷（山脊）线上的点，或者在该山谷（山脊）点处由于距离超限或角度超限找不到山谷（山脊）线的下一点时，说明此山谷（山脊）线到此结束。





# 寻找地形特征线

生成山脊山谷线时对应的4个判断因子：

- 距离因子  $S$ ，待判断点与参考点间的距离；
- 夹角因子  $\alpha 1$ ，待判断点与参考点连线和参考点处等高线张角角平分线的夹角；
- 夹角因子  $\alpha 2$ ，待判断点与参考点两点处的等高线张角角平分线的夹角；
- 夹角因子  $\alpha 3$ ，当前连接特征线段与前一连接完毕的特征线段间的转向角。





# 基于DEM的地形特征提取

- 这个算法是基于地表水流模型提出来的。
- 原理是：根据地表水流从高处流向低处的自然规律计算DEM中每一个格网点的汇水量，可以认为汇水量大于某个阈值的格网点属于汇水线（山谷线），如果将这些汇水量大于给定阈值的离散格网点按照某种规则连接起来就可以将汇水线即山谷线提取出来。





# 基于DEM的地形特征提取

- 关键是三个矩阵的生成：
- 填平原始DEM中的洼地生成无洼地高程矩阵；
- 在无洼地高程矩阵基础上计算水流方向矩阵；
- 在水流方向矩阵的基础上计算水流累计矩阵。
- 在填平洼地时用到了格网的水流方向信息，所以应先计算水流方向矩阵。

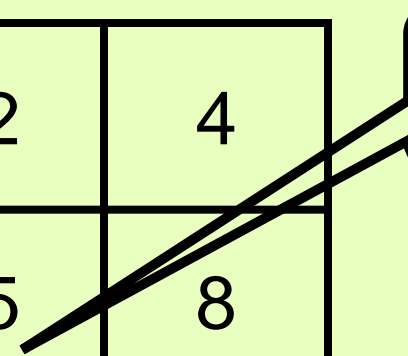


# 水流方向矩阵

- 水流方向矩阵的计算主要利用的是八方向方法
- D8方法计算中心单元到邻域八方向单元的最陡方向，即水流方向。

3	2	4
7	5	8
7	1	9

水流  
方向



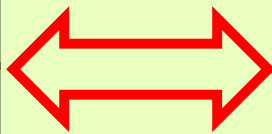





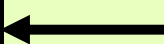
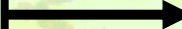





# 计算水流方向矩阵

- D8中定义了不同流向的编码，流向图及相应的流向值如图所示：

流向值		
32	64	128
16	×	1
8	4	2



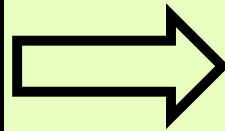
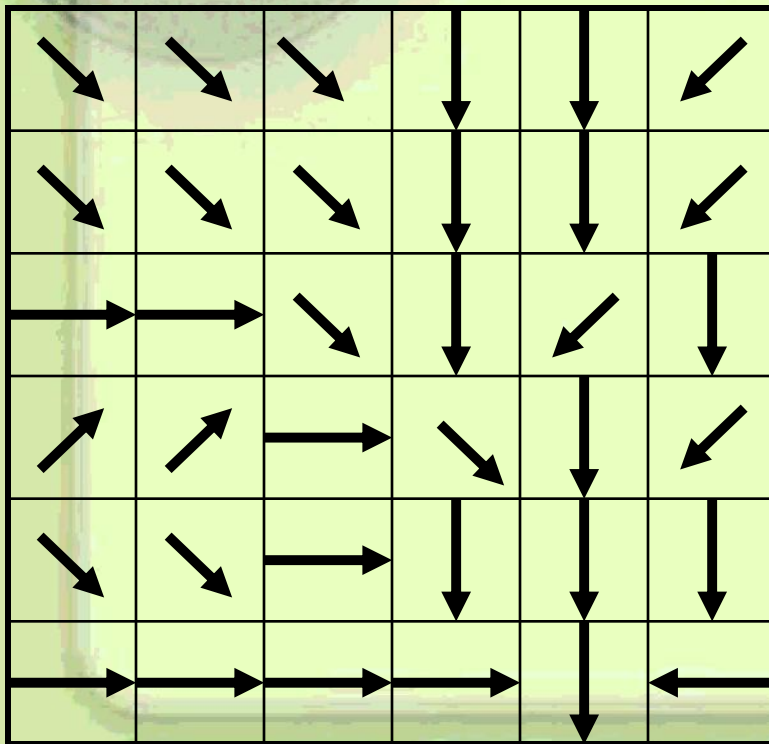
流向图式		
		
	×	
		



# 计算水流方向矩阵

- 利用D8方法就可以得到DEM的流向图和流向编码。

流水方  
向矩阵



2	2	2	4	4	8
2	2	2	4	4	8
1	1	2	4	8	4
128	128	1	2	4	8
2	2	1	4	4	4
1	1	1	1	4	16





## 洼地的检测与填平

- 在流向的判断过程中，往往会遇到小洼地，这也许是DEM的误差造成的，也许地表形态本身就是如此。
- 小洼地会影像流向线的连续性，为了解决这个问题，可以先填平小洼地，使流水能顺畅的从高往低流。



## 洼地的检测与填平

对小洼地（**无确定流向**的单元）的定义如下：

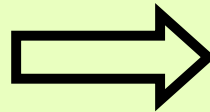
- 中间单元低，周围单元高，中间单元无确定的流向，为小洼地；
- 如果两个单元的流向互相指向对方，这两个单元无确定的流向，为小洼地；
- 如果一个单元在多个方向上有相同的高程变化，那么该单元无确定的流向，为小洼地。





# 洼地的检测与填平

- 填平独立洼地时可直接将洼地内高程值低于集水出口点高程的所有点的高程用集水出口点高程代替。
- 在得到无洼地高程矩阵之后重新计算受洼地填平影响格网的水流方向，生成最终的水流方向矩阵。





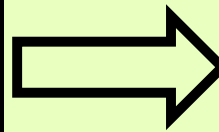
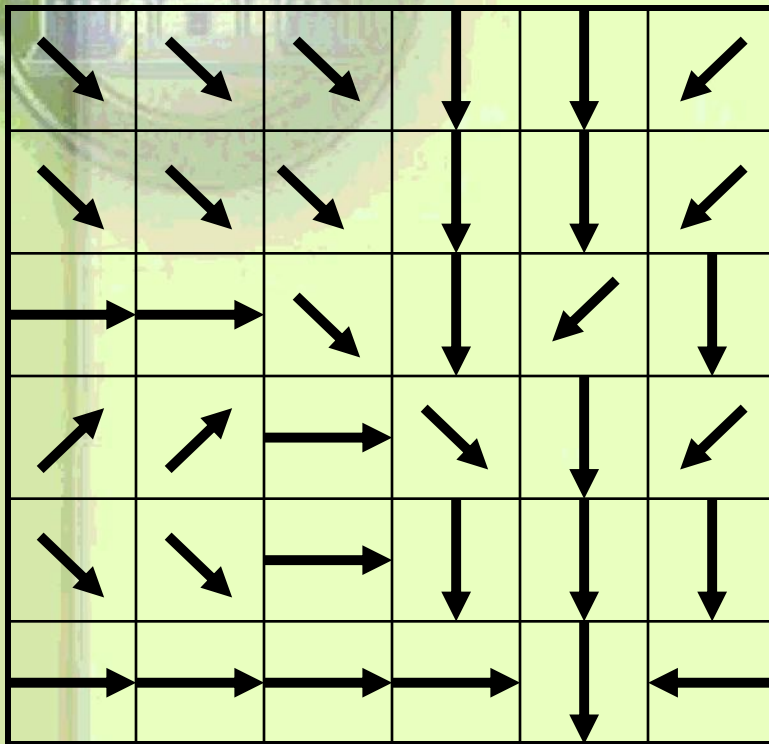


# 计算水流累积矩阵

- 有了每个单元的流向编码后，就可以计算每个单元有多少个上游单元的水流入，依据每个单元的流向计算出每个单元的汇水量。
- 一个单位代表一个格网单元，越往下游，累计的格网单元就越多。



# 计算水流累积矩阵



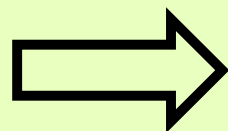
2	2	2	4	4	8
2	2	2	4	4	8
1	1	2	4	8	4
128	128	1	2	4	8
2	2	1	4	4	4
1	1	1	1	4	16



# 计算水流累积矩阵

水流累计  
矩阵

2	2	2	4	4	8
2	2	2	4	4	8
1	1	2	4	8	4
128	128	1	2	4	8
2	2	1	4	4	4
1	1	1	1	4	16



0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	2	0
0	3	7	5	4	0
0	0	0	20	0	1
0	0	0	1	24	0
0	2	4	7	35	2

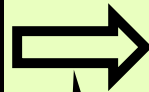




# 地形特征线的提取

- 地形特征线提取是在水流方向矩阵和水流累积矩阵的基础上进行的：预先设定一个水流累积阈值，将水流累积矩阵中高于该阈值的格网点连接起来并进行矢量化即可得到山谷线（汇水线）。

0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	2	0
0	3	7	5	4	0
0	0	0	20	0	1
0	0	0	1	24	0
0	2	4	7	35	2

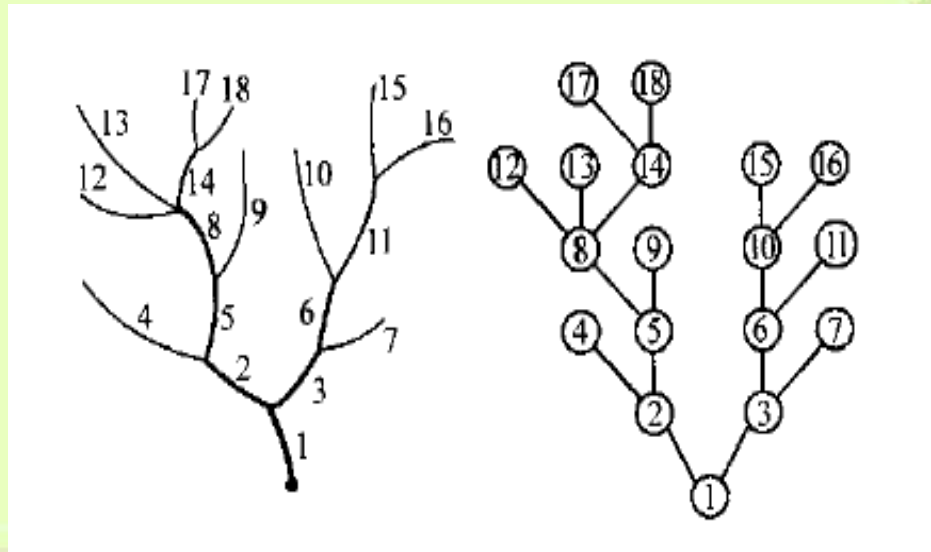



阈值为8



# 地形特征线的提取

- 在洼地填平的DEM中，各点水流经支汇水线流入主汇水线，最终都从DEM边缘流出。
- 沿DEM边缘搜索确定主汇水线终点后，采用树的生长算法可将与该终点对应的汇水流域内所有汇水线（山谷线）全部提取出来，并将这些山谷线以树状结构存贮表达。







# 地形特征线的提取

- 将原始DEM的高程矩阵整体反转，按前述方法填平洼地并计算水流方向矩阵和水流累积矩阵，然后提取出的特征线就是山脊线（分水线）。
- 累积阈值的大小决定了提取到地形特征线的详细程度，一般将其设为DEM中全部格网水流累积值的均值可以得到较优的结果。