第十一章 水文分析

水文分析是 DEM 数据应用的一个重要方面。利用 DEM 生成的集水流域和水流网络，成为大多数地表水文分析模型的主要输入数据。表面水文分析模型研究与地表水流有关的各种自然现象例如洪水水位及泛滥情况，划定受污染源影响的地区，预测当某一地区的地貌改变时对整个地区将造成的影响等。

基于 DEM 地表水文分析的主要内容是利用水文分析工具提取地表水流径流模型的水流方向、汇流累积量、水流长度、河流网络（包括河流网络的分级等）以及对研究区的流域进行分割等。通过对这些基本水文因子的提取和分析，可再现水流的流动过程，最终完成水文分析过程。

本章主要介绍 ArcGIS 水文分析模块的应用。ArcGIS 提供的水文分析模块主要用来建立地表水的运动模型，辅助分析地表水流从哪里产生以及要流向何处，再现水流的流动过程。同时，通过水文分析工具的应用，有助于了解排水系统和地表水流过程的一些基本概念和关键过程。

ArcGIS 将水文分析中的地表水流过程集合到 ArcToolbox 里，如图 11.1 所示。主要包括水流的地表模拟过程中的水流方向确定、洼地填平、水流累计矩阵的生成、沟谷网络的生成以及流域的分割等。

本章 1 至 5 节主要是依据水文分析中的水文因子的提取过程对 ArcGIS 中的水文分析工具逐一介绍。文中所用的 DEM 数据在光盘中 chp11 文件夹下的 tutor 文件夹里面，每个计算过程以及每一节所产生的数据存放在 tutor 文件夹的 result 文件夹里面，文件名与书中所命名相同，读者可以利用该数据进行参照练习。本章最后一节还提供了三个水文分析应用的实例。



图 11.1 ArcToolBox 中的水文分析模块

11.1 无洼地 DEM 生成

DEM 一般被认为是比较光滑的地形表面的模拟，但是由于内插的原因以及一些真实地形（如喀斯特地貌）的存在，使得 DEM 表面存在着一些凹陷的区域。这些区域在进行地表水流模拟时，由于低高程栅格的存在，使得在进行水流流向计算时在该区域得到不合理的或错误的水流方向。因此，在进行水流方向的计算之前，应该首先对原始 DEM 数据进行洼地填充，得到无洼地的 DEM。

洼地填充的基本过程是先利用水流方向数据计算出 DEM 数据中的洼地区域，然后计

算出这些的洼地区域的洼地深度，最后以这些洼地深度为参考而设定填充阈值进行洼地填充。

11.1.1 水流方向提取

水流方向是指水流离开每一个栅格单元时的指向。在 ArcGIS 中通过将中心栅格的 8 个邻域栅格编码，水流方向便可由其中的某一值来确定，栅格方向编码如图 11.2 所示。

32	64	128
16		1
8	4	2

图 11.2　水流流向编码

例如：如果中心栅格的水流流向左边，则其水流方向被赋值为 16。输出的方向值以 2 的幂值指定是因为存在栅格水流方向不能确定的情况，此时需将数个方向值相加，这样在后续处理中从相加结果便可以确定相加时中心栅格的邻域栅格状况。

水流的流向是通过计算中心栅格与邻域栅格的最大距离权落差来确定。距离权落差是指中心栅格与邻域栅格的高程差除以两栅格间的距离，栅格间的距离与方向有关，如果邻域栅格对中心栅格的方向值为 2、8、32、128，则栅格间的距离为 $\sqrt{2}$ 倍的栅格大小，否则距离为 1。

ArcGIS 中的水流方向是利用 D8 算法（最大距离权落差）来计算水流方向的。具体计算步骤如下：

1. 在 ArcMap 中单击 ArcToolbox 图标，启动 ArcToolbox；
2. 展开 Spatial Analysis Tools 工具箱，打开 Hydrology 工具集；
3. 双击 Flow Direction 工具，弹出（如图 11.3 所示）水流方向（Flow Direction）计算对话框；

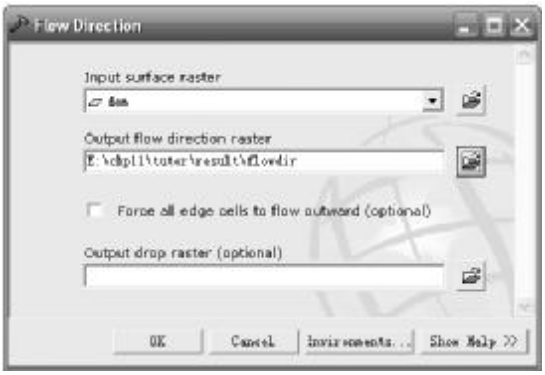


图 11.3 水流方向 Flow Direction 计算对话框

（1）Input surface data 文本框中选择输入的 **DEM** 数据：dem。

（2）在 Output flow direction raster 文本框中命名计算出来的水流方向文件名为 flowdir，并选择保存路径；

（3）若选中 Force all edge cells to flow outward(Optional)前的复选框，指所有在 **DEM** 数据边缘的栅格的水流方向全部是流出 **DEM** 数据区域。默认为不选择。这一步为可选步骤；

（4）输出 drop raster。drop raster 是该栅格在其水流方向上与其临近的栅格之间的高程差与距离的比值，以百分比的形式记录，它反映了在整个区域中最大坡降的分布情况。这一步为可选步骤；

（5）单击 OK 按钮，完成操作。按钮，完成操作。计算出的水流方向数据结果如图 **11.4**

所示。

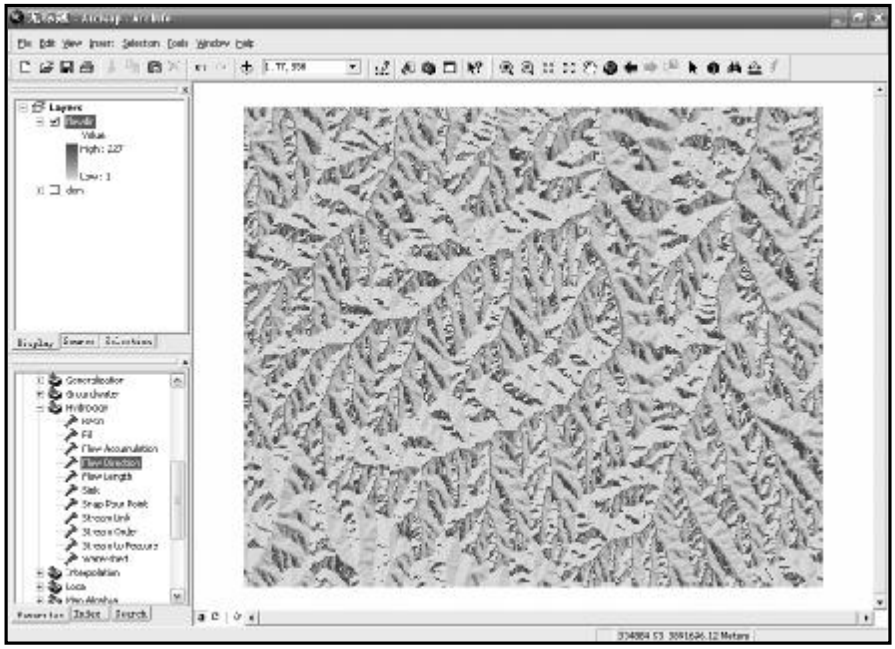


图 11.4 利用 Flow Direction 工具计算出来的水流方向图

11.1.2 洼地计算

洼地区域是水流方向不合理的地方，可以通过水流方向来判断哪些地方是洼地，然后对洼地填充。但是，并不是所有的洼地区域都是由于数据的误差造成的，有很多洼地是地表形态的真实反映。因此，在进行洼地填充之前，必须计算洼地深度，判断哪些地区是由于数据误差造成的洼地而哪些地区又是真实的地表形态，然后在洼地填充的过程中，设置合理的填充阈值。

1. 洼地提取

（1）双击 Hydrology 工具集中的 Sink 工具，弹出洼地计算对话框，如图 11.5 所示；

（2）在 Input flow direction raster 文本框中，选择水流方向数据 flowdir；

（3）在 Output raster 文本框中，选择存放的路径以及重新命名输出文件为 **sink**；

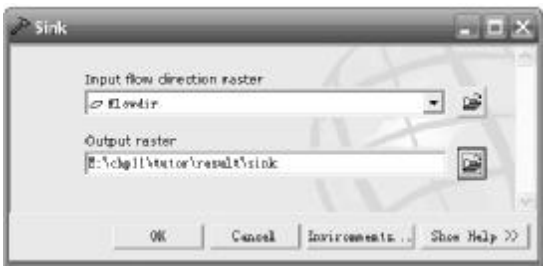


图 11.5 洼地计算对话框

（**4**）单击 **OK** 按钮，完成操作。计算结果如图 11.6 所示，深色的区域是洼地。

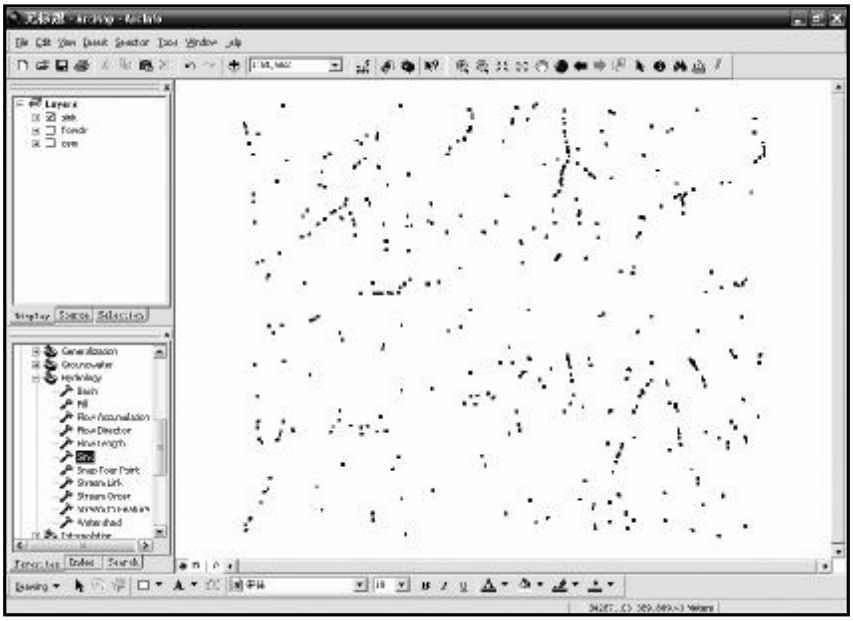


图 11.6　计算出来的洼地区域

2.　洼地深度计算

（**1**）双击 Hydrology 工具集中的 Watershed 工具，弹出流域计算对话框，如图 **11.7** 所示，它用来计算洼地的贡献区域；

（**2**）在 Input flow direction raster 文本框中选择水流方向数据 flowdir，在 Input raster or feature pour point 文本框中选择洼地数据 sink，在 pour point field 文本框中选择 value；

（**3**）在 Output raster 文本框中设置输出数据的名称为 watershsink；

（**4**）单击 OK 按钮，完成操作。计算出的洼地贡献区域如图 11.8 所示；

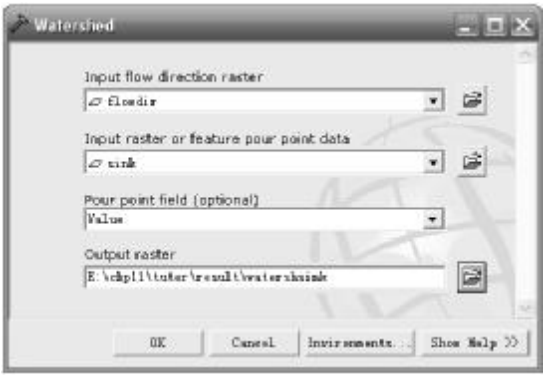


图 11.7 洼地贡献区域计算对话窗口（watershed）

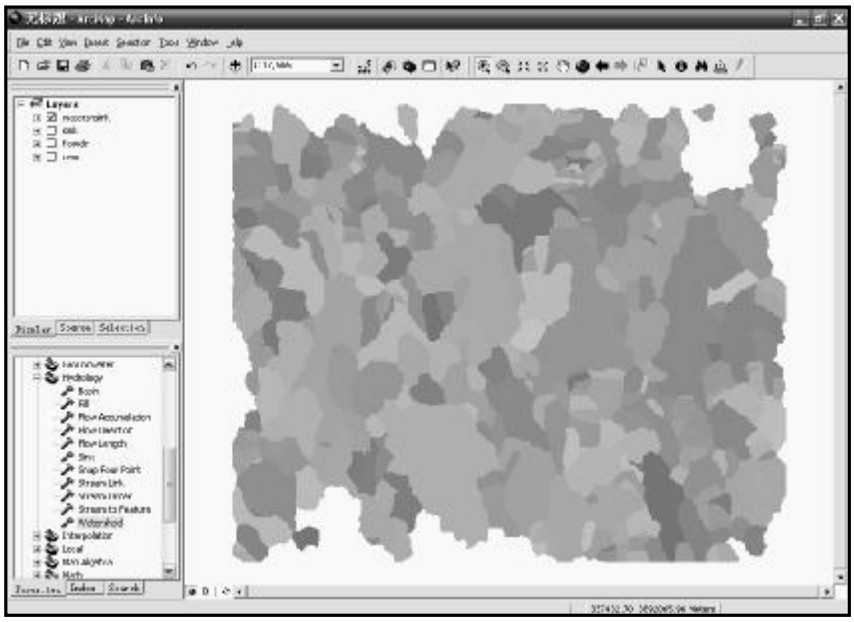


图 11.8　计算出来的洼地贡献区域

（**5**）计算每个洼地所形成的贡献区域的最低高程；

1） 打开 Spatial Analysis Tools 工具箱中 Zonal 工具集，双击 Zonal Statistic 工具，弹出如图 11.9 所示的分区统计对话框；

2） 在 Input raster or feature zonal data 文本框中，选择洼地贡献区域数据 watershsink；

3） 在 Input value raster 文本框中选择 dem 作为 value raster；

4） 在 Output raster 文本框中将输出数据文件命名为 zonalmin，存放路径保持不变；

5） 在统计类型选择的下拉菜单中选择最小值（MINIMUM）作为统计类型；

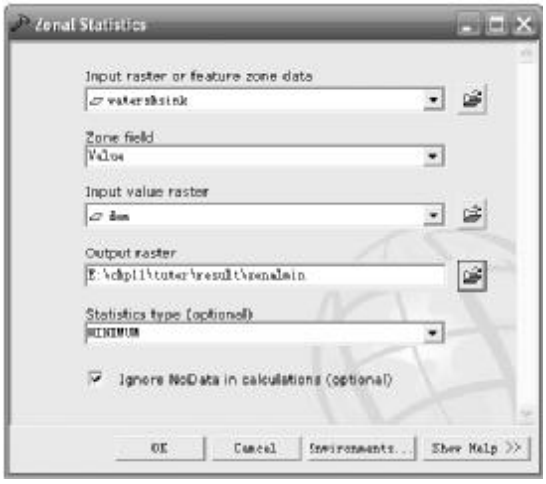


图 11.9 分区统计对话框

6） 单击 OK 按钮，完成操作。

（**6**）计算每个洼地贡献区域出口的最低高程即洼地出水口高程；

1） 打开 Spatial Analysis Tools 工具箱中 Zonal 工具集，双击 Zonal Fill 工具，弹出如图 11.10 所示的 Zone Fill 对话框；

2） 在 Input zone raster 文本框中选择 watershsink，在 Input weight raster 文本框中选择 dem，在 Output raster 文本框中将输出数据命名改为 zonalmax；

3） 单击 OK 按钮，完成操作。

（**7**）计算洼地深度。

1） 在 ArcMap 中加载 Spatial Analyst 模块，单击 Spatial Analyst 模块的下拉箭头，单击 Raster Calculator 命令，弹出 Raster Calculator 对话框，如图 11.11 所示；

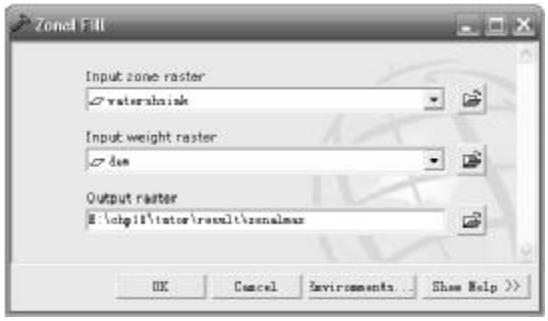


图 11.10 洼地贡献区域边缘最低高程计算对话框



图 11.11 洼地深度计算对话框

2） 在文本框里面输入 sinkdep = ([zonalmax] - [zonalmin])，然后单击 evaluate 按钮进行计算。

对于以上（5）、（6）步的计算，可以利用 Spatial Analysis Tools 工具箱中的 Map Algebra 工具集的 Multi Map Output 工具。如图 11.12 所示。

对于第（5）步，在文本框中输入：E:\chp11\tutor\result\zonalmin = zonalmin (E:\chp11\tutor\result\watershsink, E:\chp11\tutor \dem)；

对于第（6）步，在文本框中输入：E:\chp11\tutor\result\zonalmax = zonalfill (E:\chp11\tutor\result \watershsink, E:\chp11\tutor \dem)；

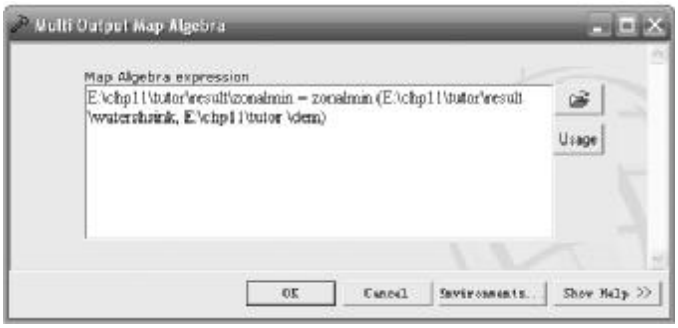


图 11.12 map algebra 计算对话框

经过以上七步的运算，就可到所有洼地贡献区域的洼地深度，如图11.13所示。通过对研究区地形的分析，可以确定出哪些洼地区域是由数据误差而产生，哪些洼地区域又是真实的反映地表形态，从而根据洼地深度来设置合理的填充阈值。

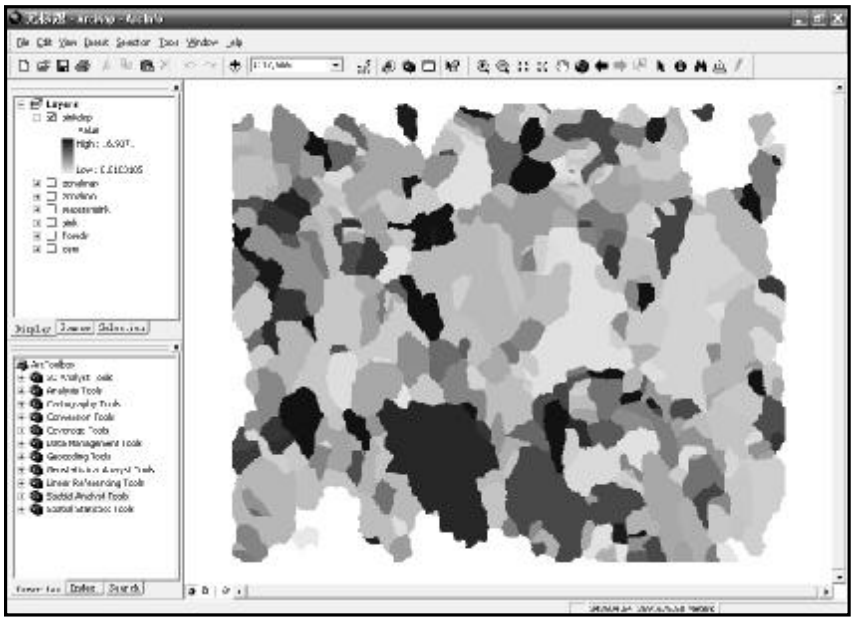


图 11.13 计算出的洼地深度图

11.1.3 洼地填充

洼地填充是无洼地 DEM 生成的最后一个步骤。通过洼地提取之后，可以了解原始的 DEM 上是否存在着洼地，如果没有存在洼地，原始 DEM 数据就可以直接用来进行河网生成、流域分割等。而洼地深度的计算又为在填充洼地时设置填充阈值提供了很好的参考。

1. 双击 Hydrology 工具集中的 Fill 工具，弹出如图 11.14 所示的洼地填充对话框；
2. 在 Input surface raster 文本框中，选择需要进行洼地填充的原始DEM数据；
3. 在 Output surface raster 文本框中设置输出文件名为 filldem；
4. 在 Z limit 文本框中输入阈值，在洼地填充过程中，那些洼地深度大于阈值的地方将作为真实地形保留，不予填充；系统默认情况是不设阈值，即所有的洼地区域都将被填平。
5. 单击 OK 按钮，完成操作。计算后的无洼地 DEM 如图 11.15 所示。

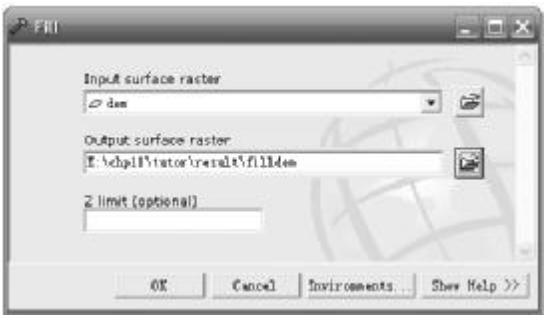


图 11.14 洼地填充对话框

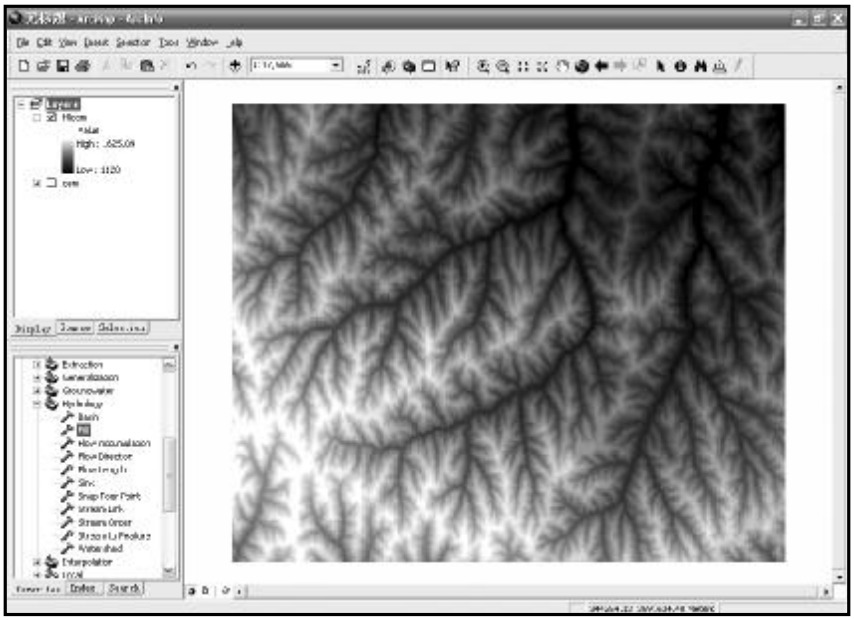


图 11.15 经过洼地填充生成的无洼地 DEM

当一个洼地区域被填平之后，这个区域与附近区域再进行洼地计算，可能还会形成新的洼地。因此，洼地填充是一个不断反复的过程，直到所有的洼地都被填平，新的洼地不再产生为止。

11.2 汇流累积量

在地表径流模拟过程中，汇流累积量是基于水流方向数据计算得到的。汇流累积量的基本思想是认为以规则格网表示的数字地面高程模型每点处有一个单位的水量，按照自然水流从高处流往低处的自然规律，根据区域地形的水流方向数据计算每点处所流过的水量数值，便得到了该区域的汇流累积量。由水流方向数据到汇流累积量计算的过程如图 11.16 所示。

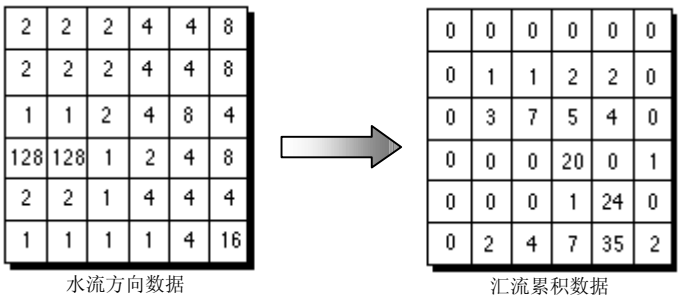


图 11.16 汇流累积量的计算

1. 基于无洼地 DEM 的水流方向的计算。计算过程同上一节水流方向的计算一样，使用的 DEM 数据是无洼地 DEM。将生成的水流方向文件命名为 fdirfill；

2. 在得到水流方向之后，可以利用水流方向数据计算汇流累积量。双击 Hydrology 工具集中的 Fill Accumulation 工具，打开汇流累积量计算对话框。如图 11.17 所示；

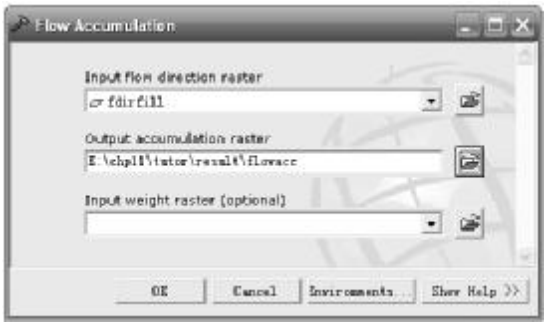


图 11.17 汇流累积量计算对话框

（**1**）在 Input flow direction raster 文本框中，选择由无洼地 **DEM** 生成的水流方向栅格数据 fdirfill；

（**2**）在 Output accumulation raster 文本框中输出数据命名为 flowacc；

（**3**）在 Input weight raster 文本框中输入权重数据，权重数据一般是考虑到降水、土壤以及植被等对径流影响的因素分布不平衡而得到的，对每一个栅格赋权重能更详细模拟该区域的地表特征。如果无权重数据，系统默认所有的栅格的权重为 **1**；

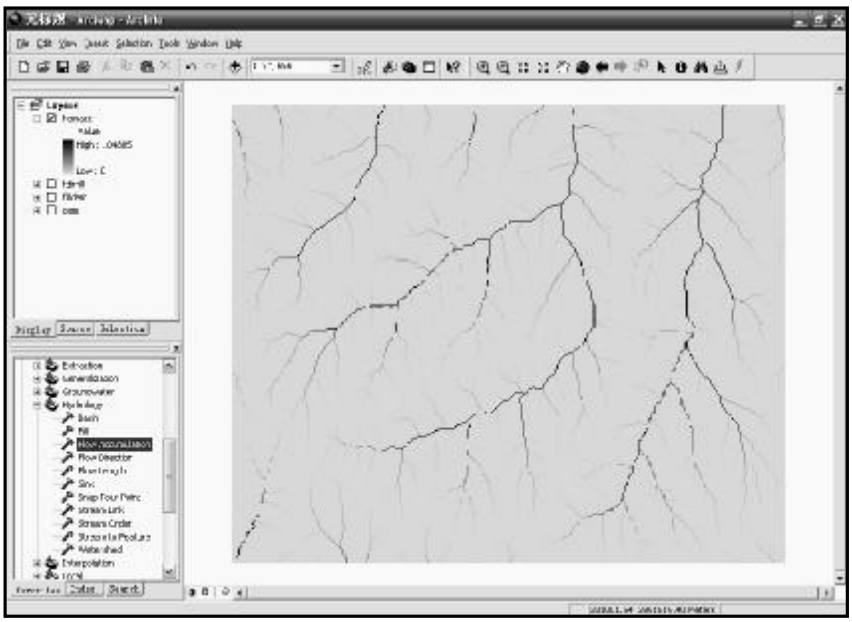


图 11.18 通过计算生成的汇流累积量数据

（**4**）单击 OK 按钮，完成操作。结果如图 11.18 所示。

11.3 水流长度

水流长度通常是指在地面上一点沿水流方向到其流向起点（或终点）间的最大地面距

离在水平面上的投影长度。水流长度直接影响地面径流的速度，从而影响对地面土壤的侵蚀力。因此，水流长度的提取和分析在水土保持工作中有很重要的意义。目前，在 ArcGIS 中水流长度的提取方式主要有两种：顺流计算和溯流计算。顺流计算是计算地面上每一点沿水流方向到该点所在流域出水口的最大地面距离的水平投影；溯流计算是计算地面上每一点沿水流方向到其流向起点的最大地面距离的水平投影。

ArcGIS 中水流长度的提取操作如下：

1. 双击 Hydrology 工具集中的 Flow Length 工具，弹出计算水流长度的对话框，如图 11.19 所示；
2. 在 Input flow direction raster 文本框中选择基于无洼地 DEM 提取出的水流方向数据 fdirfill；
3. 在 Output raster 文本框中命名输出的水流长度栅格数据文件名称。分别进行顺流计算和溯流计算，输出的数据文件分别命名为 Flowlendown 和 Flowlenup；
4. 计算方向可以选择 Downstream（顺流计算）或 Upstream（朔流计算）；

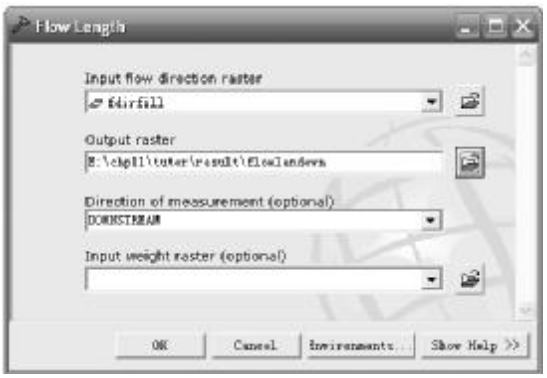


图 11.19　flow length 的计算窗口

5. 输入权重数据。顺流计算时，结果表示沿着水流方向到下游流域出水口中最长距离所流经的栅格数；溯流计算时，结果表示沿着水流方向到上游栅格的最长的距离的栅格数；
6. 当设置完成后，单击 OK 按钮，完成操作。

两种方向计算出的结果如图 11.20 和图 11.21 所示。

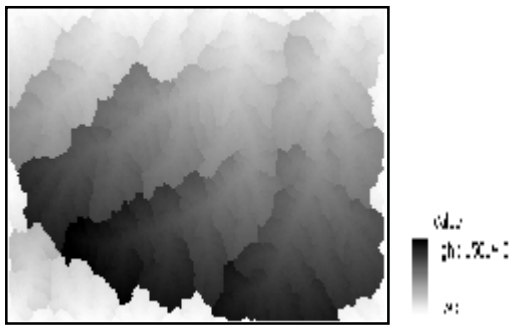


图 11.20 顺流方向上的水流长度

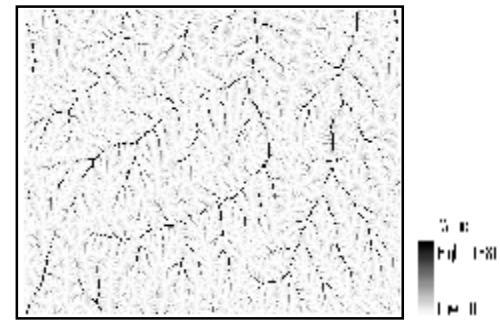


图 11.21 逆流方向上的水流长度

11.4 河网的提取

基于 DEM 的水文分析，其中一个内容就是要得到地表的水流网络。目前常用的河网提取方法是地表径流漫流模型：首先在无洼地 DEM 上利用最大坡降法得到每一个栅格的水流方向；然后利用水流方向栅格数据计算出每一个栅格在水流方向上累积的栅格数，即汇流累积量。假设每一个栅格携带一份水流，那么栅格的汇流累积量就代表着该栅格的水流量。基于上述思想，当汇流量达到一定值的时候，就会产生地表水流，所有汇流量大于临界值的栅格就是潜在的水流路径，由这些水流路径构成的网络，就是河网。

11.4.1 河网的生成

1. 河网的生成是基于汇流累积量数据的，其计算步骤见 11.2 节，这里用 11.2 节计算的汇流累计栅格数据 flowacc 作为基础数据；
2. 设定阈值。不同级别的沟谷对应不同的阈值，不同研究区域相同级别的沟谷对应的阈值也是不同的。所以，在设定阈值时，应通过不断的实验和利用现有地形图等其它资料辅助检验的方法来确定合适的阈值；
3. 栅格河网的形成。利用 Map Algebra 工具集中的 Multi Map Output 工具中的 Con 命令或者 Setnull 命令进行有条件的查询可得到栅格河网。其思想是利用所设定的阈值对整个区域分析并生成一个新的栅格图层，其中汇流量大于设定阈值的栅格的属性值设定为 1，而小于或等于设定阈值的栅格的属性值设定为无数据。栅格河网的生成也可以利用 ArcMap 中的 Spatial Analysis 分析模块下的 Raster Calculator 计算。将计算出来的栅格河网命名为 streamnet；



4. 栅格河网矢量化。在 Hydrology 工具集中双击 Stream to Feature 工具，如图 11.22 所示；在 Input stream raster 文本框中，选择 streamnet；在 Input flow direction raster 文本框中，输入由无洼地计算出来的水流方向数据 fdirfill；在 Output polyline features 文本框中将输出的数据命名为 streamfea。生成的矢量数据如图 11.23 所示。

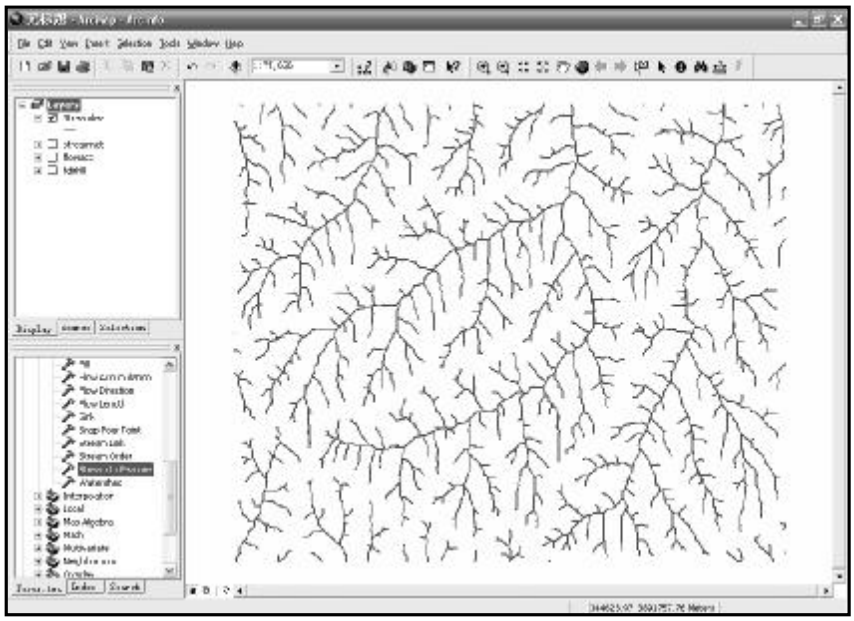


图 11.23　栅格河网转换成的矢量河网框

11.4.2 Stream Link 的生成

Stream link 记录河网中一些节点之间的连接信息，主要记录河网的结构信息。如图 11.24 所示，Stream link 的每条弧段连接着两个作为出水点或汇合点的结点，或者连接着作为出水点的结点和河网起始点。

因此通过提取 Stream link 可以得到每一个河

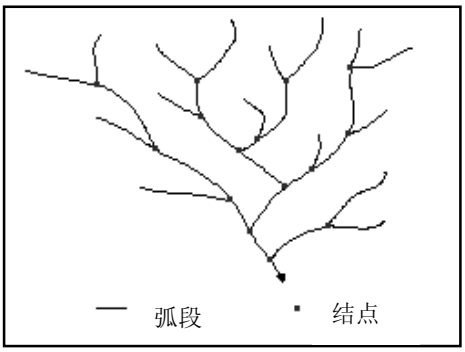


图 11.24 Stream link 示意图

网弧段的起始点和终止点。同样，也可以得到该汇水区域的出水点。这些出水点对于水量、水土流失等研究具有重要意义。出水口点的确定，为进一步的流域分割做好了准备。操作如下：

1. 在 ArcMap 里加载水流方向数据 fdirfill 和栅格河网数据 streamnet；
2. 双击 Hydrology 工具集中的 Stream Link 工具，弹出如图 11.25 所示的 stream link 计算的对话框。在 Input stream raster 文本框中选择 streamnet，在 Input flow direction raster 文本框中选择 fdirfill。在 Output raster 文本框中将输出数据命名为 StreamLink。
3. 单击 OK 按钮，完成操作。

Stream link 的生成将栅格河网分成不包含汇合点的栅格河网片段，并对片断进行记录，其属性表中除了记录该片段的 ID 号之外，还记录着每个片段所包含的栅格个数。如图 11.26 所示。



图 11.25 StreamLink 计算对话框

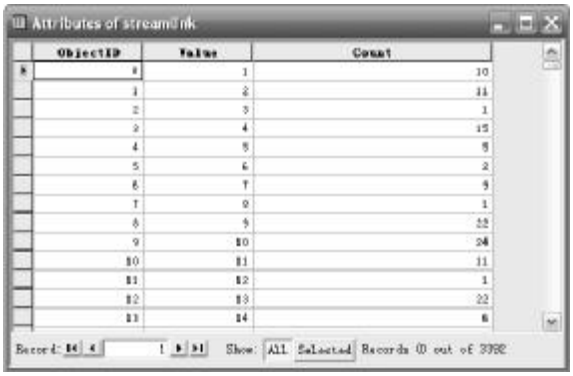
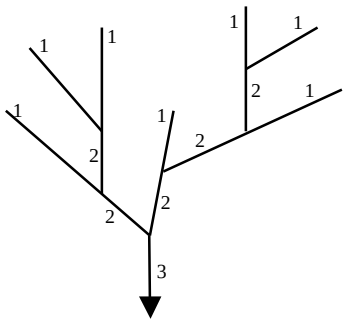


图 11.26 StreamLink 的属性框

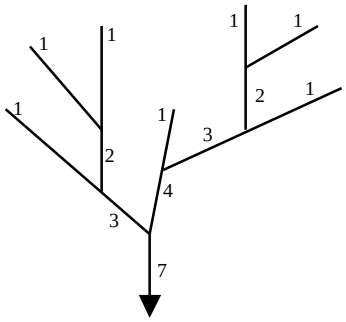
11.4.3 河网分级的生成

河网分级是对一个线性的河流网络以数字标识的形式划分级别。在地貌学中，对河流的分级是根据河流的流量、形态等因素进行。不同级别的河网所代表的汇流累积量不同，级别越高，汇流累积量越大，一般是主流，而那些级别较低的河网则是支流。这对于研究水流的运动、汇流模式，及水土保持等具有重要的意义。

在 ArcGIS 的水文分析中，提供两种常用的河网分级方法：Strahler 分级和 Shreve 分级。如图 11.27 所示， Strahler 分级是将所有河网弧段中没有支流河网弧段分为第 1 级，两个 1



Strahler 分级



Shreve 分级

级河网弧段汇流成的河网弧段为第 2 级，如此下去分别为第 3 级，第 4 级，……，一直到河网出水口。在这种分级中，当且仅当同级别的两条河网弧段汇流成一条河网弧段时，该弧段级别才会增加，对于那些低级弧段汇入高级弧段的情况，高级弧段的级别不会改变；Shreve 分级的第 1 级河网的定义与 Strahler 分级是相同的，所不同的是以后的分级，两条 1 级河网弧段汇流而成的河网弧段为 2 级河网弧段，那么对于以后更高级别的河网弧段，其级别的定义是由其汇入河网弧段的级别之和，如图所示，当一条 3 级河网弧段和一条 4 级河网弧段汇流而成的新的河网弧段的级别为 7，这种河网分级到最后出水口的位置时，其河网的级别数刚好是该河网中所有的 1 级河网弧段的个数。

在 ArcGIS 中对河网分级的步骤如下：

1. 在 ArcMap 里加载水流方向数据 fdirfill 和栅格河网数据 streamnet；
2. 双击 Hydrology 工具集中的 Stream Order 工具，弹出 Stream Order 对话框。在 Input stream raster 文本框中选择 streamnet，在 Input flow direction raster 文本框中选择 fdirfill。分别用 Strahler 分级和 Shreve 分级对河网进行分级，将输出数据分别命名为 Streamostr 和 Streamoshr；
3. 单击 OK 按钮，完成操作。计算出的两种河网分级分别结果如图 11.28 和图 11.29 所示。

对于 stream link 和 stream order 计算出的栅格数据同样可以利用 Hydrology 工具集中的 stream to feature 工具将其转化成矢量数据便于进一步的研究和分析。

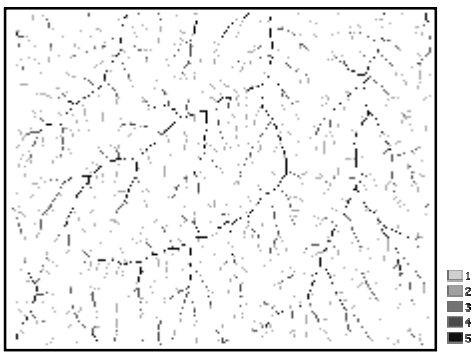


图 11.28　河网的 Strahler 分级结果

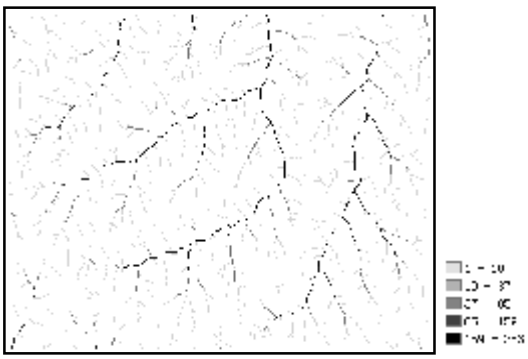


图 11.29　河网的 Shreve 分级结果

11.5 流域的分割

流域（watershed）又称集水区域，是指流经其中的水流和其它物质从一个公共的出水口排出从而形成的一个集中的排水区域，如图 11.30 所示。也可以用流域盆地（basin）、集水盆地（catchment）或水流区域（contributing area）等来描述流域。Watershed 数据显示了区域内每个流域汇水面积的大小。汇水面积是指从某个出水口（或点）流出的河流的总面积。出水口（或点）即流域内水流的出口，是整个流域的最低处。流域间的分界线即为分水岭。分水线包围的区域称为一条河流或水系的流域，流域分水线所包围的区域面积就是流域面积。

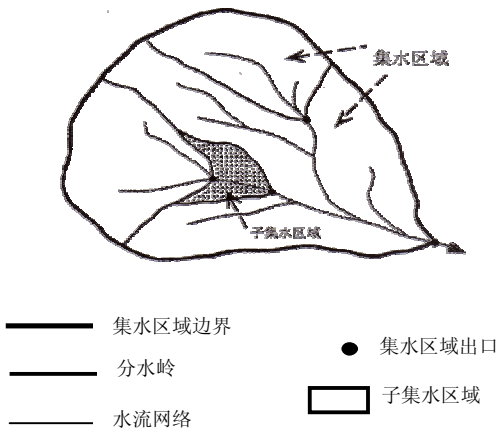


图 11.30　集水区域

11.5.1 流域盆地的确定

流域盆地是由分水岭分割而成的汇水区域，是通过对水流方向数据的分析确定出所有相互连接并处于同一流域盆地的栅格。首先要确定分析窗口边缘的出水口的位置，所有的流域盆地的出水口均处于分析窗口的边缘。流域盆地集水区的确定是找出所有流入出水口的上游栅格的位置。

在 ArcGIS 中，流域盆地的计算的操作如下：

1. 双击 Hydrology 工具集中的 Basin 工具，打开流域盆地计算的对话框。如图 11.31 所示。
2. 输入水流方向数据 fdirfill，设置输出数据文件名为 basin。
3. 单击 OK 按钮，完成操作。

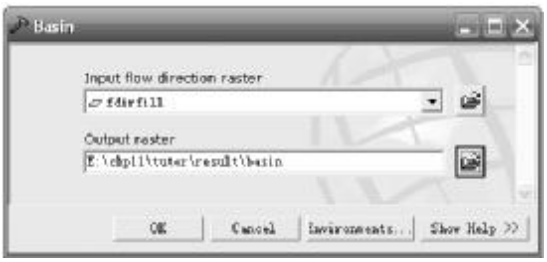


图 11.31 流域盆地计算的对话框

在 ArcMap 中加载上一节计算出的矢量河网数据在以及刚得到的 basin 数据，如图 11.32 所示。所有流域盆地的出口都在研究区域的边界上，利用流域盆地分析，可将感兴趣的流域划分出来。

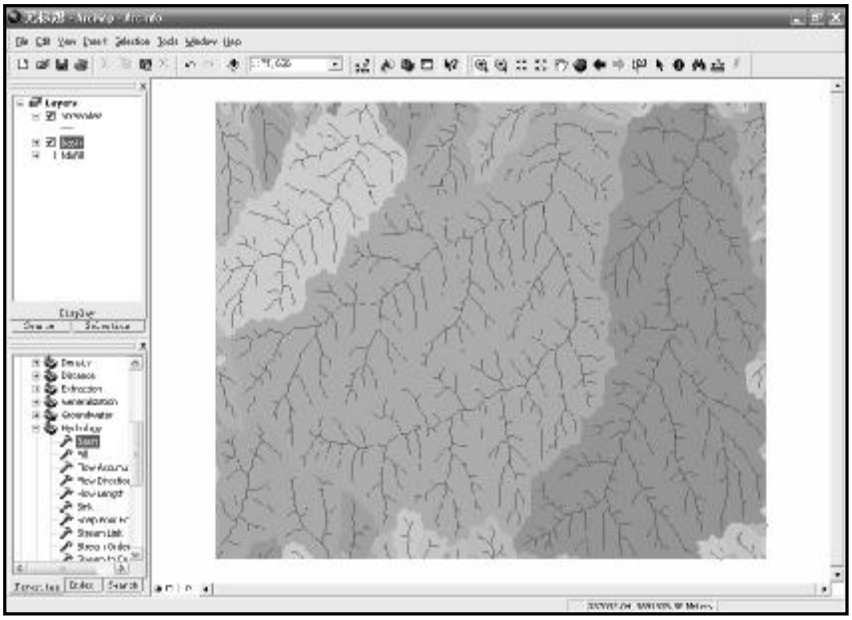


图 11.32　计算出的流域盆地(线状图形为矢量河网数据)

11.5.2 汇水区出水口的确定

在水文分析中，通常需要基于更小的流域单元进行分析，这样就需要进行流域的分割。流域的分割首先要确定小级别流域的出水口的位置，可以通过 Spatial Analysis Tools 工具箱下的 Hydrology 工具集中的 Snap Pour Point 的工具来寻找。它的思想是利用一个记录着潜在但并不准确的小级别流域的出水口的位置的数据层，在该点位置上在以指定距离在汇流累积量的数据层上搜索那些具有较高汇流累积量栅格点的位置，这些搜索到的栅格点就是小级别的流域的出水点。也可以利用已有的出水点的矢量数据。

如果没有出水点的栅格或矢量数据,可以用已生成的 stream link 数据作为汇水区的出水口数据。因为 stream link 数据中隐含着河网中每一条河网弧段的联结信息，包括弧段的起点和终点等，而弧段的终点可以看作是该汇水区域的出水口所在位置。

11.5.3 集水流域的生成

对于一个小集水流域的生成，思想如下：先确定出水点，即该集水区的最低点，然后结合水流方向数据，分析搜索出该出水点上游所有流过该出水口的栅格，直到搜索到流域的边界，即分水岭的位置。

1. 首先在 ArcMap 中打开水流方向数据 fdirfill 和流域出口点数据 streamlink；

2. 双击 Hydrology 工具集中的 Watershed 工具，打开集水区域（贡献区域）计算的对话框。分别在水流方向数据和出水口数据的文本框中选择 fdirfill 和 streamlink 数据，设置输出数据文件名为 watershed。
3. 单击 OK 按钮，完成操作。结果如图 11.33 所示，为了更好的表现流域的分割效果，在此窗口中还加载了流域盆地和矢量河网的数据。可以看出：通过 streamlink 作为流域的出水口数据所得到的集水区域是每一条河网弧段的集水区域，也就是要研究的最小沟谷的集水区域。

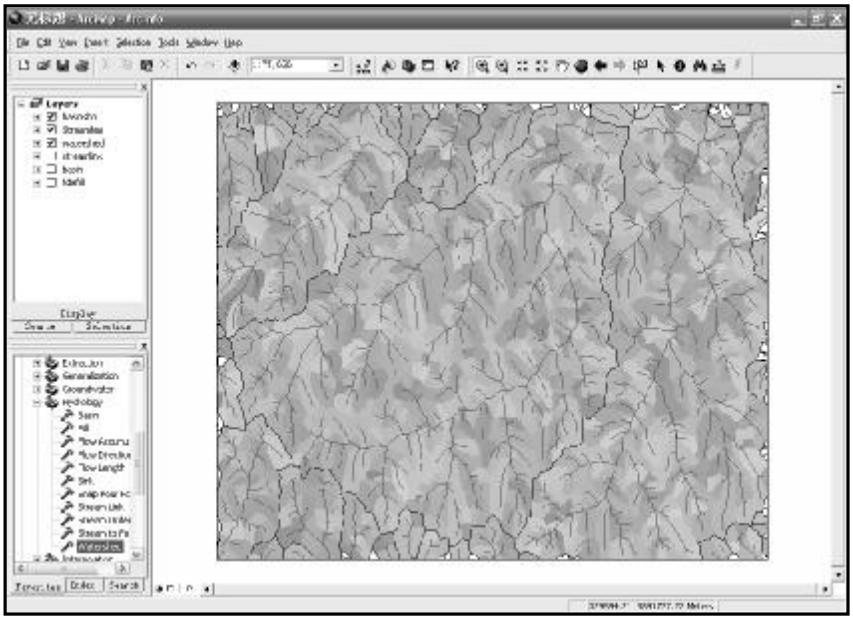


图 11.33 集水区域的计算结果

11.6 实例与练习

11.6.1 利用水文分析方法提取山脊、山谷线

1. 背景：作为地形特征线的山脊线、山谷线对地形、地貌具有一定的控制作用。它们与山顶点、谷底点以及鞍部点等一起构成了地形及其起伏变化的骨架结构。同时由于山脊线具有分水性，山谷线具有合水性特征使得它们在工程应用方面具有特殊的意义。因此在数字地形分析中，山脊线和山谷线的提取和分析是具有很大应用价值的。
2. 目的：了解基于 DEM 的水文分析方法提取出山脊线和山谷线的原理；掌握水流方向、汇流累积量的提取原理及方法；能够利用水文分析的方法与其它空间分析方法相结合以解决实际应用问题。
3. 要求：

（**1**）利用水文分析思想和工具提取研究区域的山脊线；

（**2**）利用水文分析思想和工具提取研究区域的山谷线。

4. 数据：一幅 25m 分辨率的黄土地貌 DEM 数据，区域面积大约有 140 km^2。数据存放于随书光盘…/ChP11/Ex1 目录中。

5. 算法思想：

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。因此，可以利用水文分析的方法进行提取。

对于山脊线而言，由于它同时也是分水线，而分水线的性质即为水流的起源点。所以，通过地表径流模拟计算之后，这些栅格的水流方向都应该只具有流出方向而不存在流入方向，也就是其栅格的汇流累积量为零。通过对零值的汇流累积值的栅格的提取，就可以得到分水线，即山脊线；对于山谷线而言，可以利用反地形的特点，即利用一个较大的数值减去原始的 DEM 数据，得到与原始地形完全相反的地形数据，使得原始的 DEM 中的山脊变成反地形的山谷，而原始 DEM 中的山谷在反地形中就变成了山脊，再利用山脊线的提取方法就可以实现山谷线的提取。但是这种方法会出现提取出的山脊和山谷位置有些偏差，可以利用正、负地形来加以纠正。

基于 DEM 利用水文分析的方法提取山脊线和山谷的技术流程如图 11.34 所示。

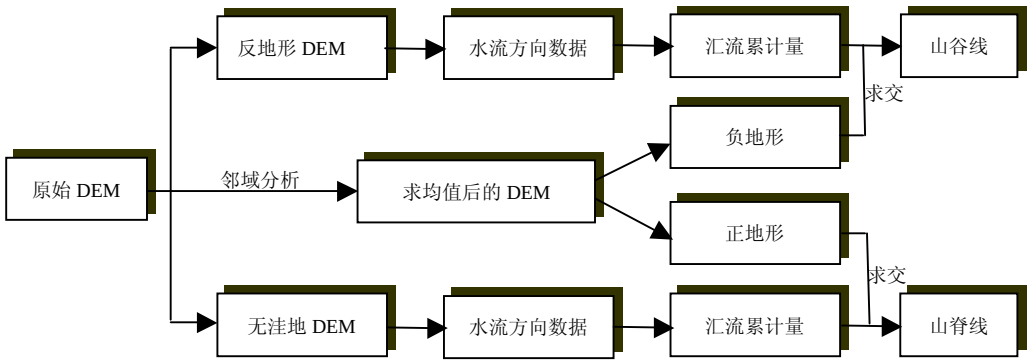


图 11.34 山脊线和山谷线的提取流程图

6. 操作步骤

（**1**）正负地形的提取

1） 启动 ArcToolbox，展开 Analysis Tools 工具箱，打开 Hydrology 工具集。在 ArcMap 中加载研究区域的原始 DEM 数据，如图 11.35 所示；

2） 加载 Spatial Analyst 模块，单击 Spatial Analyst 模块的下拉箭头，单击 Neighborhood Statistics 菜单工具，利用邻域分析的方法以 11×11 的窗口计算平均值。计算结果命名为 meandem；

3） 单击 Spatial Analyst 中的 Raster Calculator 菜单工具，对原始 DEM 数据与邻域分析之后的数据 meandem 做减法运算，并将运算结果重分为两级，分级界线为 0，则大于 0 的区域在原始 DEM 上就是正地形区域，小于 0 的区域在原始 DEM 上就是负地形区域。

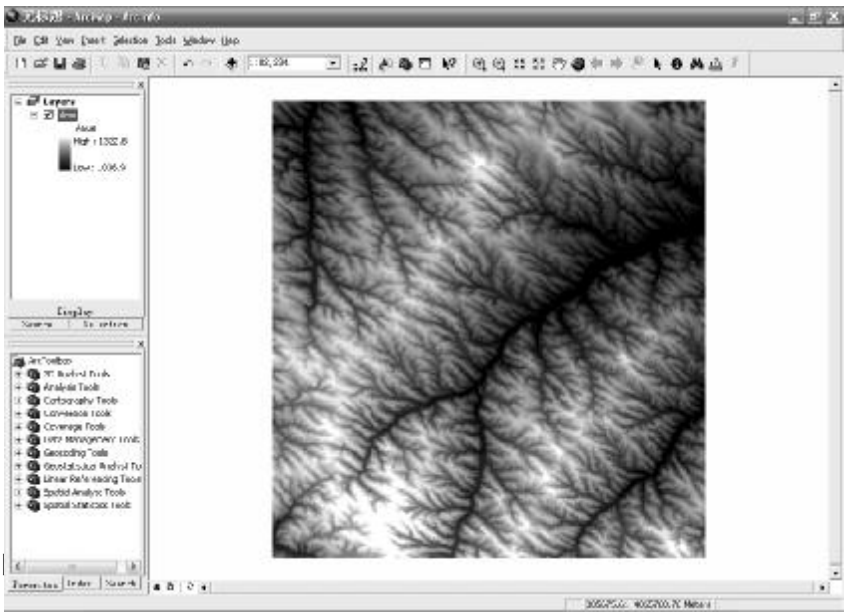


图 11.35 研究区域的 DEM 数据

4） 对上一步得到的二值化数据进行两次重分类，一次将正地形区域属性值赋值为 1，负地形区域属性赋值为 0，命名为 zhengdixing；另一次将正地形区域属性值赋值为 0，负地形区域属性赋值为 1，命名为 fudixing。结果分别如图 11.36、图 11.37 所示。

（**2**）山脊线的提取

1） 在 ArcMap 中加载研究区域的原始 DEM 数据，如图 11.35 所示；

2） 洼地填充：双击 Hydrology 工具集中的 Fill 工具，进行原始 DEM 的洼地点填充。在 Input surface raster 文本框中选择原始 DEM 数据 dem，将输出数据命名为 filldem，因为选择的是将所有洼地全部填充，所以 Z limit 为默认值；

3） 基于无洼地的水流方向的计算：双击 Hydrology 工具集中的 Flow Direction 工具，在 Input surface raster 文本框中选择填充过的无洼地 DEM 数据 filldem，将输出的水流方向数据命名为 flowdirfill；

4） 汇流累积量的计算：双击 Hydrology 工具集中的 Flow Accumulation 工具。选择 flowdirfill 作为输入的水流方向数据；输出数据命名为 flowacc1；

5） 汇流累积量为零值的提取：加载 Spatial Analyst 模块，单击 Spatial Analyst 模块的下拉箭头，单击 Raster Calculator 菜单，打开栅格计算对话框，在文本框中填写汇流累积量为零值的提取公式：facc0 = (flowacc = 0)，然后单击 evaluate 进行计算；

6） 在 ArcMap 中打开 facc0，会发现有很多的地方并不是山脊线，因此需对此数据做如下处理：利用邻域分析的方法，对 facc0 进行 3×3 邻域分析，求均值，使数据变得光滑，处理后的数据命名为 neiborfacc0；

7） 单击 Spatial Analyst 模块中的 Surfer Analyst 中的 Countline 和 Hillshade 菜单命令，分别生成原始 DEM 的等值线图 ctour 和晕渲图 hillshade。

8） 在 neiborfacc0 数据上单击右键，单击 Properties 命令，进行重新分级，将数据分为两级，这时需要不断调整分级临界点，并以等值线图和晕渲图作为辅助判断。属性值越接近于 1 的栅格越有可能是山脊线的位置，最终确定的分界阈值为 0.5541；

9） 将进行过二值化的 neiborfacc0 进行重分类为 reneibor，将属性值接近 1 的那一类的属性值赋值为 1，其余的赋值为 0。

10）利用 Spatial Analyst 菜单下的 Raster Calculator 将重分类过后的 neiborfacc0 数据与正地形数据 zhengdixing 相乘，就消除了那些存在于负地形区域中的错误的山脊线。然后将计算结果进行重分类，所有属性不为 1 的栅格属性值赋为 NO DATA。就得到了山脊线，如图 11.38 所示。

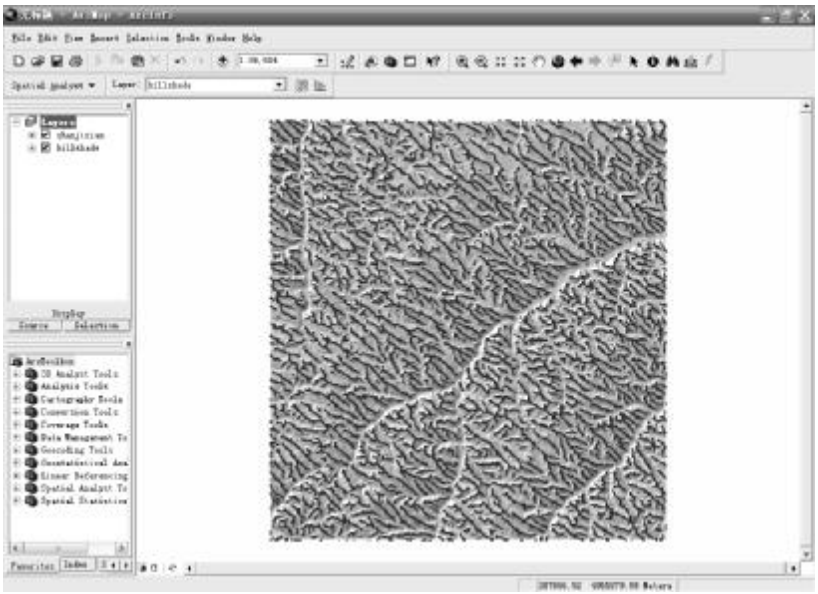


图 11.38 计算出的研究区域的山脊线

（图中深色区域为山脊线，背景为该区域的晕渲图）

（**3**）山谷线的提取

1） 在 ArcMap 中加载原始 DEM 数据，如图 11.35 所示；

2） 加载 Spatial Analyst 模块，单击 Spatial Analyst 模块的下拉箭头，单击 Raster Calculator 菜单工具，打开栅格计算对话框；在文本框中填写反地形的计算公式：fandem =Abs (dem-2000)，单击 evaluate 按钮进行计算。得到与原始 DEM 地形完全相反的反地形数据，如图 11.39 所示。反地形计算完毕之后，山谷线的提取就和山脊线的提取步骤一样的，直到最终利用重分类的方法将重新分级的邻域分析后的结果二值化为止。这里不需要对反地形 DEM 进行洼地填充。计算过程中的数据名称分别为：水流方向数据为 flowdirfan，汇流累积数据为 flowacc2，零值汇

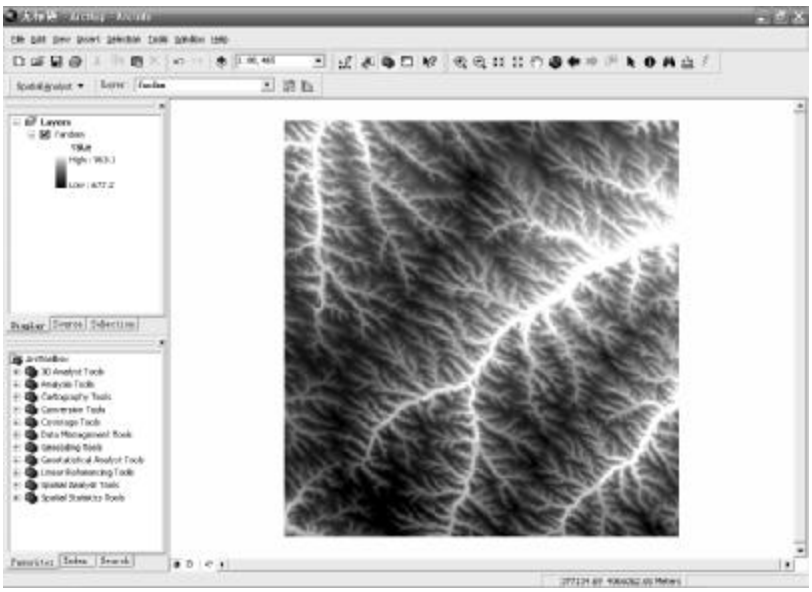


图 11.39 计算出的研究区域的反地形 DEM

流累积量提取数据为 flowacc0fan，对 flowacc0fan 进行 3×3 邻域分析求均值后的结果数据为 nbfacc0fan，并将其分级改为两级，分级阈值为 0.65677。

3） 利用 Spatial Analyst 菜单下的 Raster Calculator 将重分类过后的数据与负地形数据 fudixing 相乘，消除了那些存在于正地形区域中的错误的山谷线。然后将计算结果进行重分类，所有属性不为 1 的栅格属性值赋为 NO DATA。就得到了山谷线，如图 11.40 所示。

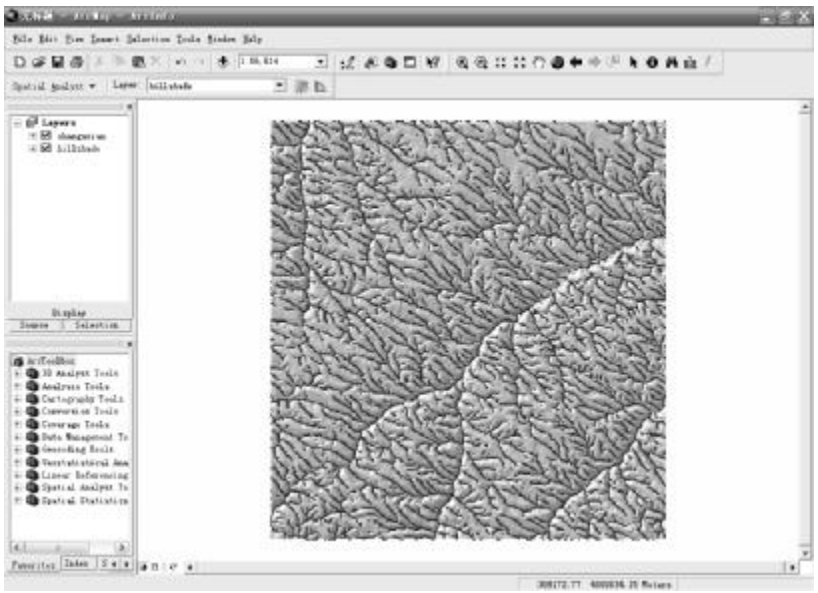


图 11.40 计算出的研究区域的山谷线

（图中深色区域，背景为该区域的晕渲图）

11.6.2 黄土地貌鞍部的提取

1. 背景：相邻两山头之间呈马鞍形的低凹部分称为鞍部，鞍部是两个山脊和两个山谷会合的地方。鞍部点是重要的地形控制点，它和山顶点、山谷点以及山脊线、山谷线等构成地形特征点线，对地形具有很强的控制作用。因此，对这些地形特征点、线的分析研究在数字地形分析中具有很重要的意义。同时，由于鞍部点的特殊地貌形态，使得鞍部点的提取方法较山顶点和山谷的提取更难，目前没有什么有效的方法来提取鞍部点，利用水文分析的方法可以来提取一些鞍部点，但还存在一定局限性。
2. 目的：结合水文分析的思想来提取研究区域内的地形鞍部点；开拓思维，拓展水文分析工具的应用，学会利用水文地质分析的思想来解决一些地形、地貌等方面的问题。
3. 要求：结合水文地质分析的方法和空间分析的方法提取研究区域的地形鞍部点
4. 数据：一幅 25m 分辨率的黄土地貌 DEM 数据，区域面积大约有 59 km2。数据存放于随书光盘…/ChP11/Ex2 中。
5. 算法思想：由于鞍部是两个山脊和两个山谷会合的地方，那么对于鞍部点的提取，就可以分别提取山脊线和山谷线，再计算两者的交点，所求出的交点便是鞍部点的位置。

   鞍部点的提取流程如图 11.41 所示。

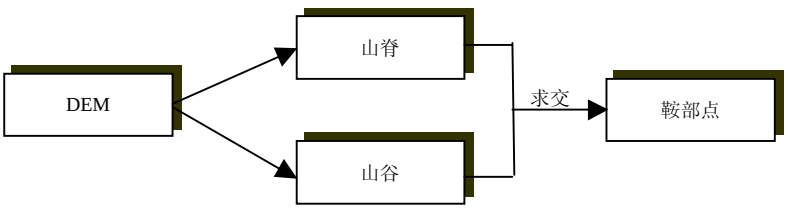


图 11.41 鞍部点的提取流程图

6. 操作步骤

（**1**）正地形、等高线和晕渲图的提取

同山脊线与山谷线的提取中一样，由于鞍部点的整体位置是处于山脊上的，需要提取出正地形以舍弃那些在负地形上的错误的提取结果。正地形的提取过程与第一个例子完全相同。提取过程分别是：利用 11×**11** 窗口进行求平均值的邻域分析，结果为 **meandem**；原始 **DEM** 与 **meandem** 相减并以 **0** 为界进行重分类，大于 **0** 的属性重新赋值为 **1**，小于 **0** 的赋值为 **0**，结果命名为 **zhengdixing**。

利用 Spatial Analyst 菜单下的 Surface Analysis 菜单中的 Contour 和 Hillshade 工具分别提取研究区域的等高距为 40m 的等高线数据 ctour 和研究区域的晕渲图 hillshade。

（**2**）山脊的提取

山脊的提取与练习 1 中山脊的提取过程是完全相同的，分别是进行洼地填充、然后在无洼地的 DEM 上提取水流方向、基于水流方向计算汇流累积量数据、提取

汇流累积量数据等于零的栅格。提取过程产生的各个数据分别为：filldem、flowdir、flowacc 以及 flowacc0。

（**3**）山谷的提取

山谷的提取也与练习 1 中山谷的提取过程是完全相同的，分别是基于原始 DEM 计算出反地形 DEM 数据（计算中是利用原始 DEM 减去常数 3000）、基于反地形 DEM 数据提取水流方向数据、基于水流方向数据进行汇流累积量数据、提取汇流累积量数据等于零的栅格。提取过程中产生的数据分别为：fandem、flowfdirfan、flowaccfan 以及 fanfacc0。

（**4**）鞍部点的提取

1） 利用 Spatial Analyst 菜单下的 Raster Calculator 的工具将提取出的山脊线数据 flowacc0 和山谷线数据 fanfacc0 相乘，运算结果命名为 anbuqu。

2） 利用同样的方法将上一步中提取出的数据 anbuqu 和正地形数据 zhengdixing 相乘，就得到了鞍部点的栅格数据，命名为 rasteranbu。

3） 将栅格数据 rasteranbu 进行重分类，所有 0 值和 NO DATA 数据赋为 NO DATA 数据，属性为 1 的值保持不变，重分类之后数据为 rasteranbu2。

4） 将栅格数据 rasteranbu2 转成矢量结构数据 anbudian，并配合等高线数据和晕渲图对矢量形式的鞍部点数据进行编辑，剔除那些处于研究区域边缘以及内部的伪鞍部点。最后得到的鞍部点数据如图 11.42 所示。

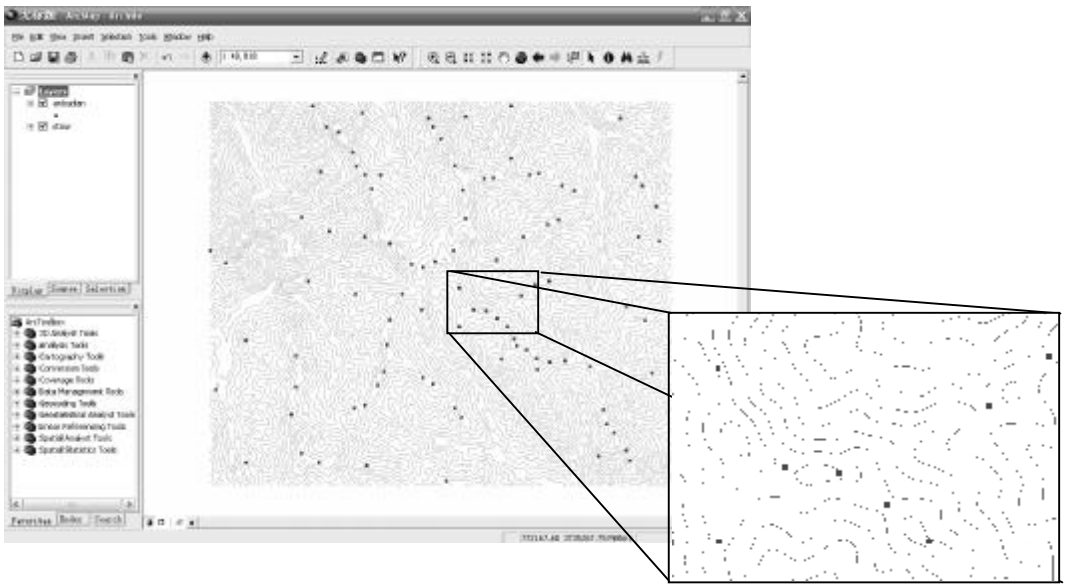


图 11.42 提取出的鞍部点图（底图为研究区 40*m* 等高距的等高线图）

11.6.3 沟谷网络的提取及沟壑密度的计算

1. 背景：

沟壑密度是描述地面被水道切割破碎程度的一个指标。沟壑密度越大，地面越破碎。破碎的地面必然起伏不平，多斜坡。这样就会使地表物质稳定性降低，且易形成地表径流。沟壑密度越大，地面径流和土壤冲刷速度越快，沟蚀发展越快。沟壑密度是气候、地形、岩性、植被等因素综合影响的反映，对于水土流失监测、水土保持规划有着重要的意义。

沟壑密度也称沟谷密度或沟道密度，指单位面积内沟壑的总长度。以 km/km^2 为单位表示，数学表达为：

$$D_S = \frac{\sum L}{A}$$

式中：D_S 指沟壑密度；ΣL 指研究区域内的沟壑总长度（单位：km），A 指特定研究区域的面积（单位：km^2）。

2. 目的：能熟悉掌握水文分析中的沟谷网络的提取原理及过程。

3. 要求：

（**1**）利用水文分析工具提取研究区域的沟谷网络；

（**2**）计算出该研究区域的沟壑密度。

4. 数据：一幅 25*m* 分辨率的黄土地貌 DEM 数据，区域面积大约有 59 km^2。数据存放于随书光盘…/ChP11/Ex3 中。

5. 操作步骤

（**1**）沟谷网络的提取：

1） 在 ArcMap 中加载研究区域的原始 DEM 数据；

2） 启动 ArcToolbox，展开 Analysis Tools 工具箱，打开 Hydrology 工具集；

3） 原始 DEM 数据提取水流方向数据：双击 Hydrology 工具集中的 Flow Direction 工具，打开 Flow Direction 计算对话框。在 Input surface data 文本框选择原始 DEM 数据作为输入表面数据，将输出的水流方向数据命名为 flowdir。单击 OK 按钮，进行水流方向数据的计算；

4） 洼地的计算：双击 Hydrology 工具集中的 Sink 工具，选择上一步计算的水流方向数据 flowdire 作为输入数据，将输出数据命名为 sink；

5） 计算得知原始 DEM 上有洼地，需要进行洼地填充。双击 Hydrology 工具集中的 Fill 工具，进行原始 DEM 的洼地点填充。在 Input surface raster 文本框中选择原始 DEM 数据 dem，将输出数据命名为 filldem；

6） 基于无洼地的水流方向的计算：同步骤 3）中一样，打开 Flow Direction 计算对话框，选择的输入表面数据是无洼地 DEM 数据 filldem，将输出的水流方向数据命名为 flowdirfill；

7） 汇流累积数据的计算：双击 Hydrology 工具集中的 Flow Accumulation 工具，打开 Flow Accumulation 计算对话框。在 Input flow direction raster 文本框中选择 flowdirfill 数据作为输入的水流方向数据；输出数据命名为 flowacc。单击 OK 按

钮，进行运算；

8） 栅格河网的生成。在栅格河网的生成中，需设置一个汇流累积阈值，这里为 100。双击 Spatial Analysis Tools 工具箱中的 Map Algebra 工具集中的 Multi Output Map 工具。在文本框中键入：E:\chp11\ex3\result\streamnet = con（ E:\chp11\ex3\result\flowacc > 100 , 1)，计算出栅格河网数据 streamnet；

9） 栅格河网矢量化：双击 Hydrology 工具集中的 Stream To Feature 工具。选择 streamnet 作为栅格河网数据输入，将水流方向数据 flowdirrfill 作为输入的水流方向数据。将输出的数据命名为 stream1，也就是矢量形式的沟谷网络；

10）伪沟谷的删除。由于基于 DEM 的河网的提取是采用最大坡降的方法，那么在平地区域例如谷底等等地方的水流方向是随机的，容易生成平行状河流，这种平行状的沟谷被称为伪沟谷，需以手工编辑剔除的。伪沟谷的剔除步骤为：

A 加载 Editor 模块，单击 Editor 模块的下拉箭头，单击 Start Editing 菜单工具，在操作目标层（target）中选择 stream1；

B 单击编辑工具中的选择符号，在 ArcMap 地图显示窗口中选择那些平行状的沟谷，单击右键，从弹出菜单中选择 Delete。研究区域边缘的很短的沟谷也需进行删除；

C 所有的伪沟谷删除完毕之后，单击 Editor 下拉菜单中的 Save Edits，对该层数据的修改进行保存，并单击 Stop Edits 停止编辑。至此，完成了伪沟谷的删除，见图 **11.43**。

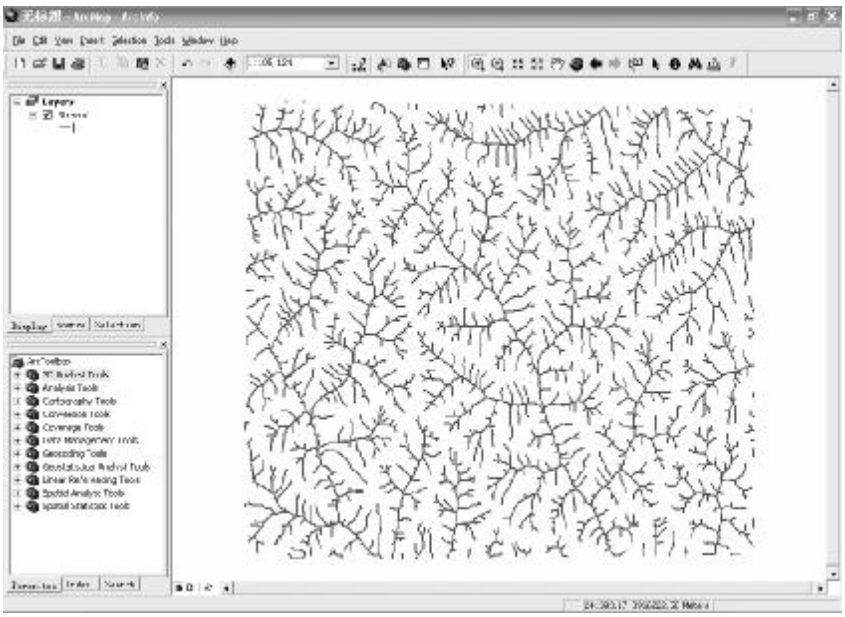


图 11.43 删除伪沟谷后的沟谷网络

（**2**）沟壑密度的计算

1） 加载 Xtools 扩展模块。单击 Xtools 下拉菜单，选择 Calculate area、Perimeter、Length、

Acres and Hectares 菜单工具，弹出如图 11.44 的对话框，在文本框中选择需要计算的矢量数据，单击 OK 按钮，进行计算。计算结果将在属性表中新建一个属性项记录。



图 11.44 计算沟壑长度对话框

2） 打开计算长度之后的矢量沟壑数据的属性表，在属性字段 Length 上单击右键弹出如图 11.45 所示的对话框，选择 Statistics 命令，进行该属性字段下属性值的统计分析。

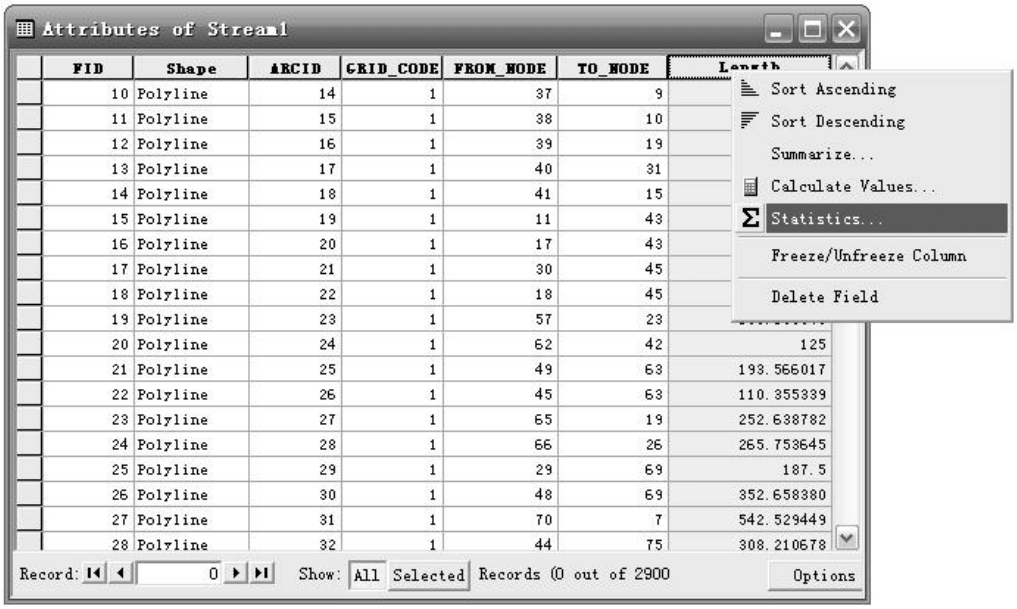


图 11.45 沟壑长度的统计计算图

3） 通过统计计算得到的沟壑总长度是：ΣL =729.395802263 km。

4） 计算研究区域的面积。在图层管理器中右键单击 DEM 数据层,单击 Propertie 命令，进入 Source 选项卡，可以看到栅格数据的行、列以及栅格分辨率，这样就可计算出研究区域的面积 A= 264.375625 km^2。

5） 得到研究区的沟壑总长度以及研究区的面积后，研究区域的沟壑密度就是：D_S= ΣL / A=2.759 km/km^2。