

从 DEM 中自动提取自然水系

陈永良^{1,2)} 刘大有^{1,2)} 虞强源¹⁾

¹⁾(吉林大学计算机科学系, 长春 130012)

²⁾(吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室, 长春 130012)

摘要 为了从数字高程数据中自动提取区域水资源信息,以提高基于 GIS 的区域水资源勘查评价工作的效率,提出了一种从 DEM 中自动提取自然水系的实用方法.该方法通过 DEM 数据预处理,首先将其中的洼地和小平原改造成斜坡;然后依据水总是沿斜坡最陡方向流动的原理,确定 DEM 中每一个栅格点的水流方向,再根据各点的水流方向数据,计算出每一个栅格点的上游给水区;接着,根据栅格点上游给水区数值,用阈值法确定水系栅格点,并对水系栅格点进行筛选;最后,根据水系栅格点的水流方向,将整个水系追索出来,另外,还用该方法对试验区的 DEM 数据进行了自动提取自然水系的试验,其结果与用手工方法提取的水系基本一致,证明该方法是有用的.

关键词 自然水系 数字高程模型 GIS 自动提取 算法

中图法分类号: P208 P285.1-39 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)01-0091-06

Automatic Extraction of Natural River System from DEM

CHEN Yong-liang^{1,2)}, LIU Da-you^{1,2)}, YU Qiang-yuan¹⁾

¹⁾(Computer Science Department of Jilin University, Changchun 130012)

²⁾(Key Laboratory of the Ministry of Education for Symbolic Computing and Knowledge Engineering, Jilin University, Changchun 130012)

Abstract Automatic extraction of regional water resource information from digital elevation data can promote the efficiency of regional water resource prospecting and assessment in GIS. Therefore, a practical method for automatic extraction of natural river system from DEM is introduced in this paper. The method, first, needs to preprocess DEM data in order to transform depressions and flat areas in the DEM into extended parts of the corresponding slopes. And then the flow direction of every grid point in the DEM is determined according to the theory of which water always flow along the steepest down-slope direction. Third, the upstream catchment's area of every grid point can be calculated on the basis of the data of grid point flow direction. Forth, giving a threshold value of upstream catchment's area picks out the grid points in river lines. Finally, the river system is pursued from DEM according to the flow direction data of grid points in river lines. The method has been applied to extracting the natural river system automatically from the DEM of a testing area. The natural river system extracted automatically with the method is basically consistent with that drew manually based on the corresponding topographical map. This experimental result has proved that the automatic extracting method is effective.

Keywords Natural river system, DEM, GIS, Automatic extraction, Algorithm

0 引 言

由于 DEM 数据能够反映一定分辨率的局部地

形特征,因此根据地形的局部特征,借助于一定的算法,就可以自动提取一定地理空间范围内的自然水系.从 DEM 中自动提取自然水系的算法过程如下:首先,依据水总是沿斜坡最陡方向流动的原理,确定

DEM 中每一个高程数据点的水流方向;然后根据高程数据点的水流方向数据来计算每一个高程数据点的上游给水区,再根据上游给水区高程数据,用阈值法确定属于水系的高程数据点;最后,根据水流方向数据,从水系源头开始,将整个水系追索出来.在国外的许多文献资料中^[1~6],都讨论了自然水系自动提取问题,例如, Yuan, Smith, Martz, Lammers 等学者在水系自动提取研究中都使用上述提取过程^[1~6].

上述方法的适用条件是,在 DEM 中不能存在小平原、洼地等地形,且所有的复杂地形都必须由斜坡构成,否则,所提取的水系通道是断断续续的.然而,在实际的 DEM 中,由于小平原和洼地的存在是普遍现象.为了使提取的自然水系,在流经小平原和洼地部位时,有一个明确的水系通道,因此在提取自然水系之前,需要对 DEM 中的小平原和洼地部位的高程数据进行改造,以使洼地和平原成为斜坡的延伸部分,经过这样的处理之后,DEM 数据中的所有地形都由斜坡构成.这样才能保证从 DEM 数据中提取的自然水系是连续的.这种将 DEM 中的洼地和平原改造成斜坡的处理过程称为 DEM 数据的预处理.

有关自然水系自动提取方面的研究资料在国内尚不多见,为此,笔者总结了国外有关的研究资料,归纳出了一种从 DEM 中自动提取自然水系的实用方法,并用 VB5.0 编制了相应的软件系统.该自然水系自动提取方法的工程流程如图 1 所示.

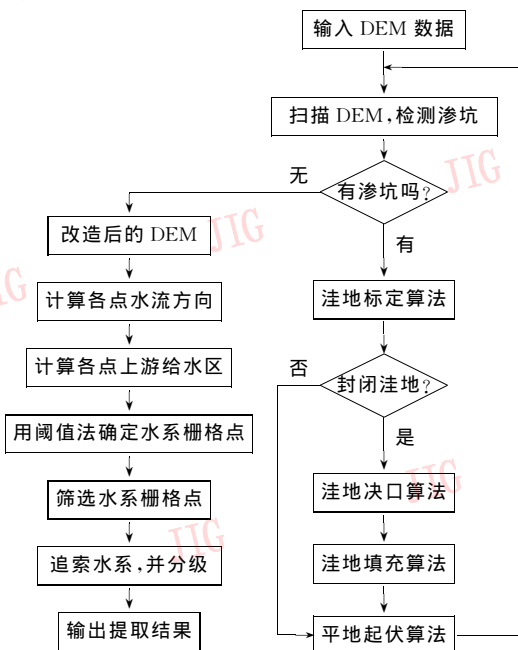


图 1 从 DEM 数据中自动提取自然水系工程流程

1 DEM 的预处理

DEM 数据预处理是为了将 DEM 中的洼地和平原改造成斜坡,即使 DEM 数据反映的地形特征均由斜坡构成.预处理算法包括:①检测 DEM 中是否有渗坑的算法;②洼地标定算法;③洼地决口算法;④洼地填充算法;⑤平地起伏算法.

1.1 检测 DEM 中是否有渗坑的算法

根据水流总是沿斜坡最陡方向流动的原理,在 DEM 中,水流可以由相邻栅格点流入某一栅格点,再由该栅格点流向另一个相邻的栅格点.如果水流流入某栅格点后,不能流向其他相邻栅格点,那么该点即为 DEM 中的渗坑.可以使用如图 2 所示的 3×3 模板来检测 DEM 中的渗坑,即将模板沿扫描线方向移动,如果模板中心栅格值(指高程值)满足条件:

$$p_0 \leq p_k \quad (k=1, 2, \dots, 8)$$

则, p_0 即为渗坑.

p_4	p_3	p_2
p_5	p_0	p_1
p_6	p_7	p_8

图 2 3×3 模板

将以上操作针对 DEM 中的所有扫描线逐条进行,即可以检测出 DEM 中的所有渗坑.检测 DEM 中是否有渗坑算法的 VB 伪码如下:

[用 3×3 模板检测 n 行 m 列的 DEM 数据中的渗坑]

```

For i=1 to n
  For j=1 to m
    kk=0
    For k=1 to 8
      If  $p_k > p_0$  Then
         $kk = kk + 1$ 
      Else
        Exit For (中止“For 循环”)
      End If
    Next k
    If  $kk = 8$  Then
      启动洼地标定算法;
      启动洼地决口算法;
      启动洼地填充算法;
      启动平地起伏算法.
    End If
  Next j
Next i

```

1.2 洼地标定算法

由于洼地(或小平原)总是围绕渗坑分布,因此检测出一个渗坑后,即可以通过以下算法确定洼地(或小平原)的范围,其算法步骤如下:

步骤 1 标记渗坑 (i_0, j_0) ,并以 (i_0, j_0) 为中心建立一个 5×5 窗口;

步骤 2 用如下算法标记窗口内的渗坑供给区:

扫描窗口内的所有栅格点,将满足下列条件的栅格点也标上渗坑标记:

- ①与带标记的栅格点相邻;
- ②高程值不低于相邻的带标记的栅格点。

该过程反复进行,直到窗口内不再有需要标记的栅格点为止;

步骤 3 用以下算法寻找洼地出水口:

扫描窗口内的所有栅格点,将满足下列条件的栅格点作为潜在出水口记录下来:

- ①栅格点带有标记;
- ②与不带标记的栅格点相邻;
- ③高程值高于与其相邻的不带标记的栅格点。

如果窗口内不存在满足条件①、②和③的栅格点或满足条件①、②和③的栅格点其高程值高于满足条件①和②,而不满足条件③的栅格点,则扩大窗口,并重复步骤 2 和步骤 3。

步骤 4 当窗口的大小可以覆盖整个渗坑供给区时,即可以先找到洼地的最低出水口;然后,检查窗口内所有带标记的栅格点,如果存在高程值低于最低出水口高程值的栅格点,则由带有标记,且高程值小于或等于最低出水口高程值的栅格点来构成 DEM 中的封闭洼地;如果带有标记的栅格点中不存在高程值低于最低出水口高程值的栅格点,则由高程值等于最低出水口的所有带标记的栅格点来构成 DEM 中的小平原。

1.3 洼地决口算法

洼地决口算法主要用来处理封闭洼地。该算法通过模拟水流漫过水系通道中的狭窄障碍物,并最终在障碍物中侵蚀出一个缺口的过程来处理 DEM 中的洼地。这里,障碍物的厚度称为决口长度,且一般决口长度小于或等于两个 DEM 栅格。洼地决口算法的基本步骤如下:

步骤 1 用以下算法寻找封闭洼地内的潜在决口点。

扫描渗坑供给区内的所有栅格点,满足下列条件的栅格点为潜在决口点:

- ①栅格点带有标记;
- ②高程与最低出水口高程相同;
- ③与不带标记的栅格点相邻;
- ④高程值高于与其相邻的不带标记的栅格点高程;
- ⑤高程值高于与其相邻的洼地内侧的栅格点高程。

如果找不到满足上述条件的栅格点,则转移到洼地填充算法;如果找到满足上述条件的栅格点,则进行步骤 2。

步骤 2 修改决口点的高程值,将决口点的高程值改为与其相邻的不带标记的栅格点的高程值,即把决口点的高程值降低,使决口点成为封闭洼地的新的最低出水口。

1.4 洼地填充算法

扫描渗坑供给区内的所有栅格点,将满足下列条件的栅格点的高程值改为最低出水口的高程值:

- ①带有洼地标记;
- ②高程值低于最低出水口高程。

通过上述的高程值修改步骤,渗坑供给区内所有栅格点的高程值均大于或等于最低出水口高程,将渗坑供给区内所有高程值等于最低出水口高程的栅格点标上小平原标记。

1.5 平地起伏算法

平地起伏算法是利用在小平原上附加高程值的方法人为地将小平原改造成斜坡。人为的地形起伏是在原高程值基础上附加小的高程增量而产生的。平地起伏算法的基本步骤如下:

步骤 1 确定小平原边界上不需要附加高程增量的栅格点,并将其小平原标记去掉:

扫描渗坑供给区内的所有栅格点,将满足下列条件的栅格点的小平原标记去掉:

- ①带有小平原标记;
- ②与其相邻的栅格点中,存在不带小平原标记的栅格点;
- ③相邻栅格中,不带小平原标记的栅格点的高程值低于带小平原标记的栅格点高程。

步骤 2 重新扫描渗坑供给区内的所有栅格点,将带有小平原标记的栅格点的高程值增加一个小的增量,返回到步骤 1。

重复步骤 1 和步骤 2,直到渗坑供给区内不存在带有小平原标记的栅格点为止。

2 水系的提取

自然水系自动提取的基本过程分以下 3 步:

①计算DEM中每一个栅格点的水流方向;②计算每一个栅格点上游给水区;③追索水系.

2.1 计算栅格点水流方向

DEM中每一个栅格点的水流方向用与该栅格点相邻的8个栅格点(即中心点四周8个方向上相邻的栅格点)中的某一个整数来表示.例如,当水流方向数据为1时,表示水流将由 p_0 流向 p_1 ,此时则使用如图2所示的 3×3 模板来计算栅格点水流方向,其算法的VB伪码如下:

[用 3×3 模板计算 n 行 m 列的DEM中栅格点的水流方向]

```
For i=1 To n
```

```
  For j=1 To m
```

```
    maxv=-999999#
```

```
    kk=0
```

```
    For k=1 To 8
```

```
      If k Mod 2=0 Then
```

```
        ang=( $p_0 - p_k$ )/(Sqr(2#)* $d_x$ )
```

```
      Else
```

```
        ang=( $p_0 - p_k$ )/ $d_x$ 
```

```
      End If
```

```
      If ang>maxv Then
```

```
        maxv=ang
```

```
        kk=k
```

```
      End if
```

```
    Next k
```

```
    vect(i,j)=kk
```

```
  Next j
```

```
Next I
```

(注:程序中的“#”表示其前面的数为实数,“*”为乘号)

2.2 栅格点上游给水区的计算

根据DEM中栅格点的水流方向数据,可以计算出DEM中每一个栅格点的上游给水区.这里将一个栅格点的上游给水区定义为水流直接或间接地流向该栅格点的栅格点数目.计算DEM中每一个栅格点上游给水区算法的VB伪码如下:

[用 3×3 模板计算 n 行 m 列的DEM中栅格点的上游给水区]

```
For i=1 To n
```

```
  For j=1 To m
```

```
    ii=i
```

```
    jj=j
```

```
Label Select Case vect(ii,jj)
```

```
  Case 1
```

```
    jj=jj+1
```

```
  Case 2
```

```
    ii=ii-1
```

```
    jj=jj+1
```

```
Case 3
```

```
    ii=ii-1
```

```
Case 4
```

```
    ii=ii-1
```

```
    jj=jj+1
```

```
Case 5
```

```
    jj=jj-1
```

```
Case 6
```

```
    ii=ii+1
```

```
    jj=jj-1
```

```
Case 7
```

```
    ii=ii+1
```

```
Case 8
```

```
    ii=ii+1
```

```
    jj=jj+1
```

```
End Select
```

```
If ii>=1 And ii<=n And jj>=1 And jj<=m
```

```
Then
```

```
  记录 ii 和 jj 的当前值;
```

```
  GoTo Label
```

```
Else
```

```
  将所有已记录的 ii 和 jj 对应的栅格点的上游给水区数据增加 1
```

```
End If
```

```
Next j
```

```
Next i
```

2.3 追索自然水系

自然水系的追索过程分以下3个步骤:①用阈值法确定水系栅格点;②筛选水系栅格点;③进行水系的追索与分级.

2.3.1 水系栅格点的确定

由于DEM中某一个栅格点若能够形成水系,则必须存在一定规模的上游给水区,因此可以根据研究区气候特征适当选择上游给水区高程阈值,并将栅格点上游给水区高程数值大于或等于给水区高程阈值的栅格点标上水系栅格点的标记.

2.3.2 水系栅格点的筛选

筛选水系栅格点算法的基本步骤如下:

步骤1 找出DEM中的所有水系起始栅格点.

该水系起始栅格点满足下列条件:

- ① 带有水系栅格点标记;
- ② 相邻的水系栅格点水流方向均不指向它.

步骤2 从水系起始栅格点开始,追索水系通

道,即根据水系栅格点的水流方向数据,向下游逐步追索水系,并计算水系的累计长度;

步骤 3 确定是否已追索到了水系交汇点.每追索出一个水系栅格点,均需检查所有相邻栅格点,如果相邻栅格点中有两个或更多的水系栅格点的水流方向指向该水系栅格点,则说明当前栅格点为水系交汇点,并将算法转移到步骤 4;

步骤 4 根据追索出的水系通道的累积长度,决定该段水系是否需要删除.如果累计长度大于预先给定的长度阈值,则不做任何操作,否则,将已经追索出的属于该水系的栅格点从水系栅格点中剔除.

以上操作将针对每一个水系起始点逐个进行,当所有水系起始点均检测完后,即结束水系栅格点的筛选过程.

2.3.3 水系的追索与分级

可以按 Strahler 的水系系统分级方案^[7]对整个水系系统进行追索和分级.追索水系算法的基本步骤如下:

步骤 1 追索 I 级水系

从水系起始点开始,根据水系栅格点的水流方向数据,向下游逐步追索 I 级水系,每追索出一个水系栅格点,就将 Strahler 水系分级数据“1”赋给该栅格点,当追索到水系交汇点时,交汇点的水系分级数据增加“1”,同时,结束该段水系的追索.以上追索过程需针对每一个水系起始点逐个进行.

步骤 2 追索 II 级及更高级水系

从两个 I 级水系的交汇点开始,根据水系栅格点的水流方向数据,向下游追索 II 级水系,并将 Strahler 水系分级数据“2”赋给每一个追索出来的水系栅格点.当追索到水系交汇点时,检查与之交汇的水系是否为低级水系,如果是,就继续向下游追索;否则,就结束该段水系的追索,并将当前栅格点

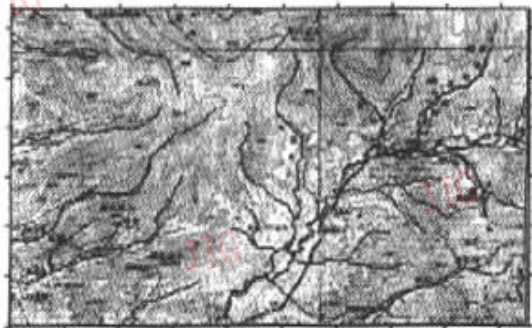
的水系分级数据增加“1”.以上追索过程需针对每一个 II 级水系的起始点逐个进行.

重复与步骤 2 相似的追索过程,就可以追索出所有高级别的水系,当所有的水系栅格点均被追索出来后,则结束水系的追索与分级过程.

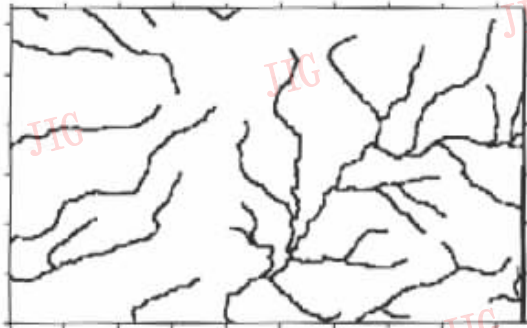
3 试验及结论

笔者用 VB5.0 开发了上述算法的软件系统,并设计了软件与 MapInfo 平台的数据接口.该程序能自动将提取的自然水系按段编号、分级,并能计算各段长度,且每段的空间信息(河流上各个结点的坐标)和属性信息(编号、级别、长度)均被写入 MapInfo Interchange 文件中.

为了测试上述算法的有效性,笔者选用小范围内的真实 DEM 数据进行了试算.该 DEM 数据为 54 行×81 列的点阵式数字高程数据,采自我国 1:20 万敦化县幅(编号:11-52-(3))地形图东南角. DEM 数据覆盖面积为 32.4km×21.6km.在地形图上,数据网格大小为 2.0mm×2.0mm,对应的实际范围是 0.4km×0.4km 的小网格.在 DEM 中,缺失的高程数据用 1.70141×10^{38} (用此数值充填,可使 DEM 数据格式与 Surfer 的输入数据格式一致)充填.根据预处理后的 DEM 数据,用本文所述算法来自动提取自然水系.图 3(a)为地形图灰度图象(*.srf),图象中的黑线表示的是实际水系(以地形图灰度图象为底图,在 MapInfo 中用“手工”方法绘制);图 3(b)为自动提取的自然水系图(已做圆滑处理).在自然水系自动提取算法中,确定水系栅格点的上游给水区阈值为 $d_q = 30$,水系栅格点筛选的长度阈值 $d_m = 5.0$.对比图 3(a)和图 3(b)可以看出,自动提取的自然水系与手工跟踪方法绘制的自然水系基本吻合,说明本文所述算法是有效的.



(a) 地形灰度图象及用手工方法提取的自然水系



(b) 用本文算法自动提取的自然水系

图 3 试验区地形灰度图象及提取的自然水系图

但应该指出的是,在地形平坦地区(本区南部的沼泽地区),自然水系往往弯弯曲曲,几乎是随机地流过平原区。在这种情况下,由于本文所述算法没有考虑随机因素对河流的影响,因此,自动提取的水系与实际水系存在位置上的误差。从图 3(a)和图 3(b)对比也可以明显地看出,这种误差主要表现为自动提取的水系比较平直,而实际水系则弯弯曲曲。

参 考 文 献

- 1 Yuan L P, Vanderpool N L. Drainage network simulation[J]. Computers & Geosciences, 1986,12(5):653~665.
- 2 Smith T R, Zhan Ci-xiang, Gao Peng. A knowledge-based, two-step procedure for extracting channel networks from noisy DEM data[J]. Computers & Geosciences, 1990,16(6):777~786.
- 3 Martz L W, Jong E D. CATCH: A fortran program for measuring catchment area from digital elevation models[J]. Computers & Geosciences, 1988,14(5):627~640.
- 4 Martz L W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models[J]. Computers & Geosciences, 1992,18(6):747~761.
- 5 Martz L W, Garbrecht J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM[J]. Computers & Geosciences, 1999,25(6):835~844.
- 6 Lammers R B, Band L E. Automating object representation of drainage basins [J]. Computers & Geosciences, 1990,16(6):787~810.

- 7 Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology [J]. Trans. Am. Geophys. Union, 1957,38(6):913~920.
- 8 Agostino V D, Stanghellini M, Liuzzi G T. A fortran-77 program for preliminary extraction of drainage networks based on a DEM[J]. Computers & Geosciences, 1993,19(7):981~1006.

陈永良 1965年生,吉林大学地球探测与信息技术学院副研究员,数学地质博士,计算机学科博士后。现主要从事矿产资源评价、数学地质方法、计算机图形图像处理、地理信息系统开发等方面的研究工作。

刘大有 1942年生,吉林大学计算机科学系主任,教授,博士生导师。现主要从事模式识别、分布式人工智能、知识工程、组件式地理信息系统等方面的研究工作。

虞强源 1973年生,吉林大学计算机科学系讲师,在职博士研究生。现主要从事知识工程、组件式地理信息系统等方面的研究工作。