

河网自动提取技术中 DEM 的几种预处理算法及应用

赖格英^{1 2 3}, 于 革¹, 桂 峰^{1 3}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008 ;

2. 鄱阳湖生态环境与资源研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330027 ; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在基于 DEM 自动提取流域水系的过程中, AVSWAT2000 模型提供了处理凹地和平坦区的功能, 但在实际应用中仍存在问题. 如有时无法形成相互联结的完整水系, 会出现不合理的水系分支等. 围绕基于 DEM 的河网自动提取技术, 对凹地和平坦区的 DEM 预处理方法进行了比较和评述, 并将 Ao Tianqi 等提出的 DEM 预处理算法应用于实际模拟研究. 结果表明, 该算法能较好地改善 AVSWAT2000 在自动提取流域水系中所表现出来的凹地和平坦区处理方面的不足, 推求的河网及流域出水口与数字河网具有较好的一致性.

关键词 河网自动提取技术; DEM; 预处理算法

中图分类号 P338

文献标识码 A

文章编号 1000-198X(2005)04-0386-05

基于数字高程模型(DEM)的河网自动提取技术是流域过程模拟中的一个重要内容, 它主要依据 DEM 所提供的地形信息来推求并形成流域的排水系统. 自动提取的河网精度对水文和水环境的模拟结果有直接影响. 为了确保和提高流域过程模拟的精度及可靠性, 自动提取的河网应尽可能地与实际河网一致. 然而, 在基于 DEM 的河网自动提取过程中, 凹地和平坦区是确定水流方向和推求完全相联结的排水系统的主要障碍与挑战^[1]. 为了提高河网的自动提取精度, 应对原始的 DEM 进行预处理, 以解决凹地和平坦区带来的种种问题. 针对这些问题, 研究人员开发了大量的从 DEM 中去除凹地和平坦区的自动算法, 许多基于 GIS 的流域过程模拟模型也都采用或集成了凹地和平坦区处理的不同技术, 如 Arcinfo 采用了由 Jenson 和 Domingue 提出的方法^[2], AVSWAT2000 则采用了“填凹”技术.

AVSWAT2000 是美国农业部(USDA)农业研究署(ARS)研究开发的一个基于地理信息系统(GIS)的土壤与水评估模型, 该模型集成了去除凹地和平坦区的 DEM 预处理模块^[3], 但在实际应用中仍存在问题. 本文将 Ao Tianqi 等^[4]提出的 DEM 预处理算法应用于实际研究, 并较好地解决了 AVSWAT2000 在自动提取流域水系时所出现的问题.

1 河网自动提取中 DEM 的预处理

1.1 DEM 中的凹地和平坦区

数字高程模型(DEM)是一个有序的高程数组, 通常以等高线格式、栅格格式和不规则三角网(TIN)格式^[5]进行存储. 由于栅格格式的高程模型与遥感数据有较好的兼容性, 并且用它来进行地形分析相对较为简单和容易, 因而用 DEM 推求流域水系和确定地表水流方向时多采用这种格式. 但 DEM 中的凹地和平坦区将使得地表水流方向难以确定和流域水系出现推求误差, 因此原始的 DEM 必须经过一定的处理才可以用于河网的自动提取. 所谓凹地是指这样一些栅格单元, 它们的高程比环绕它四周的栅格单元的高程低^[6]; 而平坦区是指栅格单元高程没有差异的区域, 它的出现会造成水流方向平行, 生成不合理的排水系统. DEM 中的凹地可以是自然景观中地形特征的一种反映. O 'Callaghan 等^[7]指出, 受冰川作用的地区和喀斯特景观地区都

收稿日期 2004-10-08

基金项目: 国家科技部 973 资助项目(2002CB412300-1); 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX1-SW-12); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金资助项目(2004405311)

作者简介: 赖格英(1963—)男, 江西寻乌人, 教授, 博士研究生, 主要从事 GIS、遥感和流域过程模拟方面的研究.

存在自然的地形凹地,但在 DEM 中,大部分凹地是由高程采样和数据处理中的误差造成的,属于“伪凹地”^[8,9]。无论出于何种原因,凹地的出现都带来了水流方向上的问题,导致了 3 种不切实际的排水方向——相反、相交和循环,无法获取相互联结的排水网络^[4](图 1)。

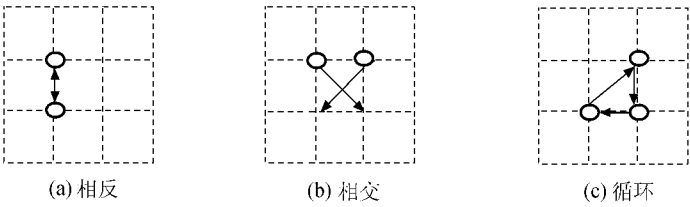


图 1 3 种不切实际的排水方向

Fig.1 Three impractical drainage directions

由于上述原因,原始的 DEM 都要经过适当的预处理,才能除去所包含的凹地和平坦区。
1.2 DEM 中凹地和平坦区的去除方法

DEM 中的凹地和平坦区可通过手工方法和计算机自动算法来处理。手工方法的排水坡度通常由经验给出。当凹地和平坦区很多时,手工方法很费时,故一般采用计算机自动处理算法。现有的自动算法主要有 4 种。(a)DEM 平滑法^[2,7]。该算法主要通过将凹地的高程增加到与凹地相邻的最小高程来实现去凹目的。(b)裂口”方法^[10,11]。该方法通过降低凹地边缘某处的相关高程来实现去凹目的。这种方法由于减少了需处理的栅格单元的数量,因而可以有效地缩短计算时间。但这两种方法也存在一些问题:高程的改变会导致原始 DEM 数据的信息损失;凹地处的排水坡度由经验给出,缺乏物理基础^[9,11]。(c)第 3 种方法的基本思路是直接确定包括凹地区域在内的相对大的范围的排水方向,而不进行凹地处的填充。如 Chorowicz 等^[8]的剖面扫描法和 Nakayama 的遗传算法——GA(Genetic Algorithm)都属于这种方法。这种方法在某种程度上可避免原始 DEM 数据的信息损失,但其中的一些参数也是通过主观方法来确定的,缺乏物理基础。此外,剖面扫描法自身无法完全产生相互联结的河网^[7]。(d)第 4 种方法由 Ao Tianqi^[4]提出,是第 1 种方法的改进。其基本思路类似于填凹算法,但填充的高程增量是基于较大范围的地形倾斜以及凹地位置来计算的,具有空间分布特征,在一定程度上克服了经验性的缺点而呈现出一定的物理基础,理论上能消除所有的凹地和平坦区,生成的平坦区的排水模式是收敛的,无需做任何进一步的处理。

当平坦区水流方向难以确定时,一般按区域内的整体坡向,以空间分布方式适当改变平坦区内的高程增量,然后结合其他算法(如 D8 算法)来获得排水方向并提取河网。

2 应用中的问题及处理方法

2.1 应用中的问题

在应用 AVSWAT2000 对 DEM 进行流域数字河网自动提取的实际研究中,采用的 DEM 分辨率为 100 m,由 ArcGIS 8.3 在 1:25 万的原始数字地形图(平原区进行 1:5 万的数字化补插)基础上插值而成。该 DEM 的基本地形统计特征为:最小高程为 3 m,最大高程为 1 787 m,平均高程为 156.2 m,标准差为 212.3 m。AVSWAT2000 是 SWAT2000 与 ArcView 3.2a 的集成版本,具有较强的 GIS 空间数据处理能力和较好的可视化界面。在基于 DEM 进行河网自动提取时,用 DEM 平滑法处理凹地问题并提供了“Burning in”方法。水流方向的确定采用了 D8 算法。D8 算法是基于 DEM 定义水流方向的最简单且使用最广泛的一种方法^[13],由 O’Callaghan 等^[7,14]提出。ESRI GIS 软件就采用了这种算法。AVSWAT2000 在用上述方法自动提取流域河网时取得了比较好的效果,但也出现了一些问题。(a)有时无法形成相互联结的完整水系,会出现不合理的水系分支。(b)水系的出水口存在较大的不确定性。这是因为 D8 模型本身无法解决平坦区的水流方向问题,而“Burning in”方法只提供了数字河网(现实河网)附近有限区域的水流方向信息,平坦区水流方向问题无法解决。(c)由于平坦区水流方向问题没有解决,提取的河网出现了平行的河道。

图 2 是由 AVSWAT2000 推求的河网及生成的流域边界和出水口,图 3 为图 2 中 A 区的放大图。由于上述原因,自动推求的河网在图 3D 处出现了裂纹,从而使完整的水系出现 2 个分支,形成了 2 个总的出水口(A

处和B处),实际上,现实河网的出水口在A处,图3C处出现了平行的河道.

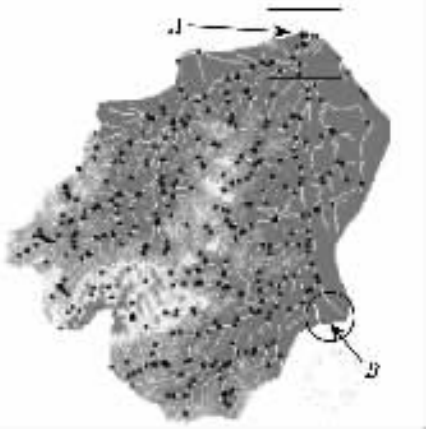


图2 推求的流域河网及流域出水口
Fig.2 Drainage networks and outlets of watershed extracted from original DEM

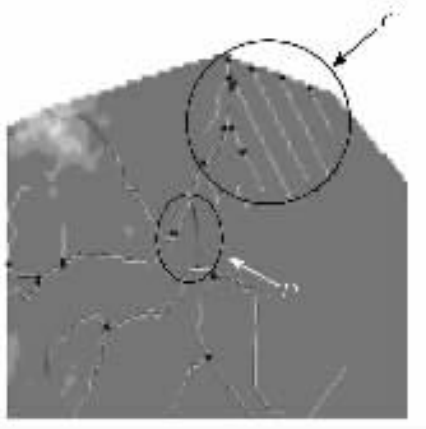


图3 图2A区的放大
Fig.3 Magnified A area in Fig.2

2.2 处理方法

为了解决上述问题,采用Ao Tianqi等^[4]提出的处理凹地和平坦区的算法对原始的DEM进行预处理.该算法的基本原理是,按流域和凹地的位置确定大范围的地形走势,并由此决定每个空间单元的高程增量,使高程增量呈空间分布格局.因此,该算法理论上是具有物理意义的,在某种程度上可以应用于任何地形和任何分辨率的DEM,自动除去所有的凹地和平坦区,使提取的河网收敛.此外,该算法还具有编码容易的特点,便于计算机实现.

- Ao Tianqi 算法的基本思路和步骤如下:
- a. 将原始的 N_r 行、 N_c 列的 DEM,按照凹地和平坦的定义,从 DEM 的坐标原点出发,扫描行和列,判断是否存在凹地栅格单元或平坦栅格单元.坐标原点一般设置在 DEM 的高端处某个角上.如 DEM 的地形趋势为左上角向右下角倾斜,则 DEM 的左上角为高端,坐标原点设置在左上角(即水源处).对于 S 形和 U 形地形或更复杂的地形,可以将 DEM 划分成逻辑上的许多小块,使每个地形小块基本保持单一的地形倾斜,以确定坐标原点,然后在每个地形小块中应用该法.
 - b. 按式(1)计算凹地和平坦区的高程增量.

$$dh(i,j) = h_c \left(1 - \frac{\alpha_i + \beta_j}{N_r + N_c} \right) \tag{1}$$

式中:dh——凹地或平坦区的高程增量; (i,j) ——凹地或平坦区的 y 和 x 坐标; h_c ——常数,一般取 0.1 m; α, β ——权重系数,表示地形在 y 和 x 方向上倾斜的程度.假定 α, β 为正值且满足 $\alpha + \beta = 2$,一般地,可以简化处理为 $\alpha = \beta = 1$.如果要进一步反映地形的宏观倾斜特征,则 α 和 β 采用不同的值,取值范围一般为 $1 \geq \alpha > 0$ 和 $1 \geq \beta > 0$.

从方程(1)可以看出,凹地或平坦区离坐标原点(在地形剖面的高端处)越远,dh 值越小,其最大值接近于 h_c .

- c. 改变凹地或平坦区的高程,即填充高程.对于任意的凹地或平坦区栅格单元 (i,j) ,通过方程(1)可求出 dh.凹地或平坦区栅格单元 (i,j) 的高程为

$$h_m(i,j) = h_0(i,j) + dh(i,j)$$

其中 $h_0(i,j)$ 为凹地或平坦区栅格单元 (i,j) 近邻的最小高程.

- d. 重复 a~c,直到原来所有的和新产生的凹地和平坦区被去除.
- 再利用 AVSWAT2000 对处理过的 DEM 进行河网自动推求,结果整个流域生成了相互联结的水系,且整个流域只有 1 个出水口,生成的河网及水流方向基本与数字河网一致(图 4).

3 结 语

DEM 的凹地和平坦区是自动提取水系的障碍,因而在自动提取水系前,必须对 DEM 进行预处理,以去

除其中的凹地和平坦区.在对各类处理方法的比较及个别方法的应用中可以看出:

a. 在对凹地进行处理时,简单地增高凹地处的高程,虽然可以解决凹地问题,但同时也可能产生新的平坦区,导致自动提取排水系统时水流方向难以确定,需要做进一步的处理.比较理想的“去凹填充”方法,应该考虑流域的基本地势,并在此基础上使凹地处高程的增量呈空间分布格局.这样的“去凹”处理,可以得到比较好的结果.平坦区是导致出水口不确定^[15,16]和河道平行的主要因素.因此,在不影响整体地形格局的情况下适当改变高程并使其呈空间分布趋势,可以在某种程度上解决平坦区问题.

b. Ao Tianqi 提出的处理凹地和平坦区的算法,其思路是在不影响整体地形格局的情况下,适当改变局部高程并使其呈空间分布趋势,因此本质是为河网的自动提取提供更丰富的高程信息.值得注意的是,对于 DEM 分辨率有限的情形(如平原地区),仅依靠 DEM 提供的信息已不足以获得整体地形格局的情况下,Ao Tianqi 算法无法完成 DEM 的预处理,从而也无法推求完全有效的河网水系.但这种情况已不是凹地或平坦区等 DEM 的局部问题了.

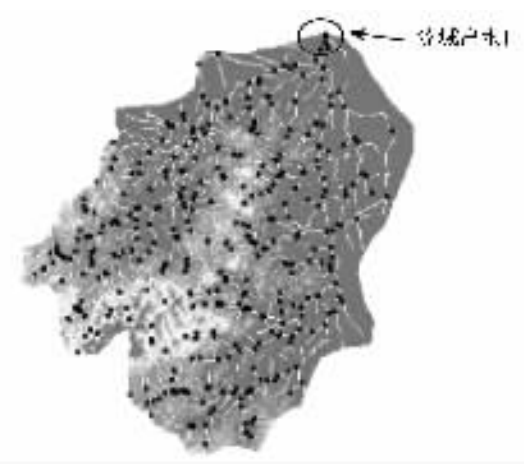


图 4 由 Ao Tianqi 算法处理后的 DEM 在 AVSWAT2000 下推求的河网和流域出水口

Fig.4 Drainage network and watershed outlet extracted by AVSWAT2000 model based on DEM processed by an algorithm presented by Ao Tianqi

参考文献:

[1] GARBRECHT J ,MARTZ L W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models[J]. Journal of Hydrology ,1997 ,193 :204—213.

[2] JENSON S K ,DOMINGUE J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis[J]. Photogramm Engng Remote Sens ,1988 ,54(11) :1593—1600.

[3] ECKHARDT K ,HAVERKAMP S ,FOHRER N ,et al. SWAT-G ,a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth ,2002 ,27 :641—644.

[4] AO T ,TAKEUCHI K ,ISHIDAIRA H , et al. Development and application of a new algorithm for automated pit removal for grid DEMs [J]. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques ,2003 ,48(6) :985—997.

[5] COSTA-CABRAL M C ,BURGES S J. Digital elevation model networks (DEMON):a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal area[J]. Water Resource Res ,1994 ,30(6) :1681—1692.

[6] TARBOTON D G ,BRAS R L ,RODRIGUEZ-ITURBE I. On the extraction of channel networks from digital elevation data[J]. Hydrol Processes ,1991 ,5 :81—100.

[7] O 'CALLAGHAM J F ,MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision Macroscale hydrological models[J]. Hydrol Processes ,1984 ,5 :59—79.

[8] CHOROWICZ J ,CHOKU C ,RIAZANOFF S ,et al. A combined algorithm for automated drainage network extraction[J]. Water Resource Res ,1992 ,28(5) :1293—1302.

[9] TRIBE A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models : a review and a new method [J]. Journal of Hydrology ,1992 ,139 :263—293.

[10] MARTZ L W ,GARBRECHT J. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models : a review and a new method—comment[J]. Journal of Hydrology ,1995 ,167 :393—396.

[11] MARTZ L W ,GARBRECHT J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM[J]. Comput Geosci ,1999 ,25(7) :835—844.

[12] TURCOTTE R ,FORTIN J ,ROUSSEAU A N ,et al. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network[J]. Journal of Hydrology ,2001 ,24(3) :225—242.

- [13] FAIRFIELD J , LEYMARIE P. Drainage networks from grid digital elevation models[J]. Water Resource Res ,1991 ,22(5) :709—717.
- [14] MARK D M. Automated detection of drainage networks from digital elevation models[J]. Cartographic ,1984 ,21 :168—178.
- [15] HUTCHINSON M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits[J]. Journal of Hydrology ,1989 ,106 :211—232.
- [16] O 'DONNELL G , NIJSSEN B , LETTENMAIER D P. A simple algorithm for generating streamflow networks for grid-based macroscale hydrological models[J]. Hydrol Processes ,1999 ,13(8) :1269—1275.

Comparison and application of several DEM hydrologic preprocessing algorithms for automated drainage network extraction

LAI Ge-ying^{1 2 3} , YU Ge¹ , GUI Feng^{1 3}

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology , Chinese Academy of Science , Nanjing 210008 , China ;

2. Key Lab of Poyang Lake Ecological Environment and Resource Development
of Ministry of Education , Nanchang 330027 , China ;

3. Graduate School of Chinese Academy of Science , Beijing 100039 , China)

Abstract In regard to some problems of AVSW AT2000 model in the treatment of flat areas and depressions based on DEM , such as unable to form an integral drainage network with unreasonable river branches occurring , etc. , a comparative analysis was made of DEM algorithms for pretreatment of flat areas and depressions in the process of automatic extraction of drainage networks. The DEM preprocessing algorithm , presented by Ao Tianqi , et al. was applied to practical simulation. The result shows that the algorithm overcomes the disadvantages of AVSW AT2000 model. The drainage network and outlet information derived by the algorithm are in good agreement with digital stream networks.

Key words automated drainage network extraction ; DEM ; preprocessing algorithm

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32 - 1521/C , ISSN1671 - 4970 , 季刊 , 自办发行)

本刊以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导,坚持实事求是的思想路线,贯彻“双百”方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

本刊为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、史学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章。本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。本刊为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊。

本刊由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行,每本定价5元,每本邮费1元,全年订费24元。欢迎广大读者直接向编辑部订阅。联系地址:南京市西康路1号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部,邮政编码210098,联系电话(025)83786376。