

文章编号:0559-9350(2005)05-0531-07

基于数字高程模型的河网提取及子流域生成

叶爱中¹,夏军^{1,2},王纲胜²,王晓妮¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101)

摘要:提出新的从DEM直接提取河网与划分子流域的方法(AEDNM)。该方法与以往方法的不同之处在于不再对DEM进行填洼处理,而是结合图论与水文学的思想,从流域的出口直接向上游搜索,通过图的遍历来确定流向,使全流域形成一个有向无环图,这样提取的河网可以保证是连续的,同实际河网误差很小。根据河网划分的子流域大小也基本均匀,能够满足水文模型模拟的需求。经过黄河、泾河与白河流域的算例验证,表明该法简单可行。

关键词:流向;河网;数字高程模型;子流域;图论;水文学

中图分类号: P333

文献标识码: A

1 问题的提出

经典的分布式水文模型采取的是划分网格的形式进行产流计算,这种计算方法在理论上是可行的,但实际中由于模型的复杂度过高,又无法得到实际网格的实测数据,使分布式水文模型的精度相对较低,大大限制了分布式模型的应用。第2代分布式水文模型大多是建立在子流域的基础上,而子流域是通过DEM得来,既有物理意义同时又简化了计算,大大提高了分布式水文模型的精度。但其面临的一个问题是如何通过DEM提取河网与划分子流域。

从DEM提取河网主要有3种方法:(1)利用谷地连成河网。该法是由Greysukh, Pekuker, Douglas等人提出,Carrol, Tribe等人后来对其进行了改进^[1]。其思想是找出DEM中的谷地单元,将谷地单元连接后形成河网。所谓的谷地单元即是周围有某些相邻单元高度大于该单元的单元^[2]。该法计算简单,问题在于谷地单元往往是不连续的,导致生成的河网间断,遇到大面积的平地也不能很好的识别。(2)利用流向信息识别河网。为了解决河网的不连续性,Mark, O'Callaghan, Mark^[3]等人提出利用流向确定河网。该法的计算步骤是:计算每个单元的流向(指水流离开网格时的指向);通过流向确定水流累积矩阵;选择一个阈值,将所有水流累积值大于该阈值的点连结起来即是河网。该法目前已经得到广泛的应用,如在著名的ArcGIS、ArcView等软件中就是采用的该法。但此法无法回避的两个问题:一是如何处理DEM中存在洼地;二是如何处理DEM中存在大片的平地。一旦出现这两种情况就会出现不连续的或平行的河网。后来很多学者对DEM进行填洼处理来消除洼地影响,通过抬升平地来避免产生大量不合理的平行河网^[4~6]。但填洼时无法区分洼地的真伪,还极易人为造出大片的平地,必然改变原始的DEM,使提取的河网与实际河网误差很大。(3)谷线搜索提取河网。该法思想由Yoeli提出^[1]。他的思想是由DEM最低点按照河谷向上坡延伸,逐步确定河网。该思想目前也有很多学者使用。

绝大多数的研究人员都想努力得到连续的河网。但现有的方法中都没有很好地解决洼地与平地的的问题,从而导致生成的河网不是有间断就是与实际河网不符。

针对以上的问题,传统方法不能很好地解决,本文在前人研究的基础上,综合第2与第3种方法,即

收稿日期:2004-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50239050);中国科学院知识创新项目(CX10G-E01-08/KZCX2-SW-317)

作者简介:叶爱中(1978-),男,安徽安庆人,博士研究生,研究方向为系统水文学。E-mail: Aizhongye@etang.com

运用第 3 种方法的思想,第 2 种方法的步骤,结合图论中图的遍历,研制了一套自动提取河网划分子流域的方法(AEDNM:Automated Extraction of Drainage Network Model)。该法很好的解决了 DEM 中的洼地与平地给提取河网带来的问题。

AEDNM 主要解决了如下几个问题:(1)通过图的遍历确定了流域中每个网格的流向;(2)由流向得到每个网格的水流累积值,求出水流累积矩阵;(3)用水流累积矩阵结合流向定出流域的河网(连续的);(4)通过河网将一个流域划分成多个子流域。

2 基本理论和方法

2.1 流向的确定 水流方向是指水流离开网格时的指向,即水流离开单元的最大坡度方向,它决定着地表径流的方向及网格单元间流量的分配,是基于 DEM 的分布式水文模型中的一个十分关键的问题。目前,关于水流方向的确定主要有 6 种方法:D8 方法(或单流向法)、Rh08 方法、多流向法、Aspect drive 方法、DEMON 方法和 ERS 方法。应用比较广泛的是 D8 方法^[7~9]和多流向法,其中 D8 方法易与水文模型结合,但在计算流域起作用的面积方面不如其他方法。

D8 方法首先将网格 X 的 8 个邻域网格编码,流向便可以用其中的一个值来确定,网格方向的编码如图 1。

图 1 网格中(1),(2),..., (8)表示 X 的 8 个邻居;1,2,...,128 表示 X 的指向。例:如果网格 X 的水流流向左边(邻居(1)),则其水流方向被赋值 16。

本文确定流向的思想是:从流域的出口出发向流域上游搜索,逐个确定每个网格的流向。每个网格的流向不仅要考虑它向周围 8 个邻居的坡度,同时要从全流域整体的思想出发,保证每个网格水流能够流到流域出口。两个网格间坡度计算公式如下:

$$Slope_i = \frac{E - E_i}{D} \quad (1)$$

式中: $Slope_i$ 为某个网格同它周围的第 i 个邻居间的坡度; E 、 E_i 为网格及其邻居的高程; D 为两网格间的距离(同 1,2,3,4 号邻居的距离就是网格的边长,同 5,6,7,8 号邻居的距离是网格的边长乘以 $\sqrt{2}$)。

如果仅仅依靠每个网格的坡度确定每个网格的流向,即是 D8 方法。该法的缺点是如有洼地的流域就无法得到连续的河网。本文采用了每个网格的坡度,同时从河口开始向上游逐个确定流向的方法。即先定河口网格的流向为 99999,再确定河口邻居的流向。如果由坡度判断其邻居的流向是指向河口的,则定下该网格的流向,若不是则以后再定。将定好流向的网格与未定流向的网格分开,按最大坡度原理作为参考来确定未定流向的网格的流向,若是指向已有流向的网格则定下该网格的流向,如此直到所有网格都有流向为止。若流域中出现洼地,则会出现无法指出的网格,这就要搜索已经定流向的网格的邻居,在其未定流向的邻居中找一个最低点,让该点的流向指向其已经定流向的邻居(若有多个则指向坡度最大的)。如此可以使全流域形成一个有向无环图。

确定水流方向的具体步骤如下:(1)设置两个栈:栈 1、栈 2,栈 1 存储已定流向的网格,栈 2 存储已定流向网格的未定流向的邻居网格编号;(2)定出流域的出口,给其流向值定为 99999(表示是流域出口),并将该网格压入栈 1 中;(3)搜索栈 1,将栈 1 中网格的未定流向的邻居网格存入栈 2 中;(4)搜索栈 2,依次计算栈 2 中网格 i (i 为网格编号)的最大落差值,如果网格 i 的最大落差值指向的网格是已定流向的网格 j (j 为网格编号),则让其流向指向网格 j ,并将网格 i 没有定流向邻居存入栈 2 中,将网格 i 从栈 2 中踢出压入栈 1 中;(5)如果栈 1 没有变化且栈 2 的大小大于 0,则表示没有新网格的流向被确定,但流域中仍有未定流向的网格,则在栈 2 中找出高程最低的网格 k ,计算网格 k 同已定流向的邻居的最大落差值,记下最大落差值网格 m ,让网格 k 指向网格 m ,将网格 k 从栈 2 中踢出压入到栈 1 中,将网格 k 没有定流向邻居存入栈 2 中;(6)重复步骤(4)、(5)直到栈 2 为空。

从步骤(4)中不难看出,如果洼地的周围有已经定了流向的网格,洼地里面的网格只要其最大落差值网格流向是已知的,就可以定出洼地里面的网格流向,并能保证洼地里面的水能够流到流域的出口,

32(5)	64(2)	128(6)
16(1)	X	1(3)
8(8)	4(4)	2(7)

图 1 网格编码

而简单的 D8 方法是无法保证洼地里面的水流出来的。若遇到较大的洼地,步骤(5)中取最低点让其流出,这也符合水向低处流的自然规律,这样保证了流域中每个网格的水都能够流到流域的出口。这一点也保证了后来提取的河网的连续性。对于大片平地同样不会出现很多的平行河网。

2.2 水流累积矩阵的确定 水流累积矩阵表示区域地形每点的水流累积量,它可以用区域地形曲面的流水模拟方法得到。流水模拟可以用区域 DEM 的水流方向矩阵来进行。其基本思想是:它认为以规则网格表示的数字地面高程模型每点处有一个单位的水量,按照水从高处流向低处的自然规律,根据区域地形的水流方向矩阵计算每点处所流过的水量数值,便可以得到该区域水流累积数字矩阵。在此过程中实际上使用了权值为 1 的权矩阵,如果考虑特殊情况(如降水不均匀),则可以使用特定的权矩阵,以更精确计算水流累积值。所以计算水流累积矩阵就必须知道 DEM 中网格的流向,在已知流向的前提下可以按照下面的方法计算出水流累积矩阵。

计算水流累积矩阵步骤如下:(1)设置一个栈,栈 1;将 DEM 每个网格编号存入栈 1 中;(2)给栈 1 每个网格的水流累积值赋初值 0;(3)搜索栈 1,将栈 1 中每个网格指向的网格的水流累积值加 1;(4)将水流累积值没有变化的网格从栈 1 中踢去;(5)重复步骤(3)、(4)直到栈 1 为空。

如果所给 DEM 是只有一个出口的封闭流域,流域出口的水流累积值应该是网格总数减 1。

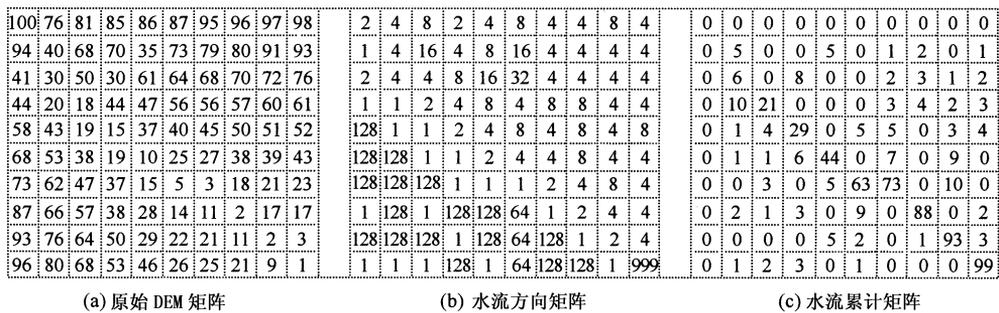


图 2 一个简单的 DEM 矩阵及其计算结果(AEDNM 计算结果)

2.3 河网的提取 在得到每个网格流向与水流累积值后,即可确定该流域的河网。

预先设定一个阈值,该阈值表示河网中点的最小积水面积,将水流方向累积矩阵中数据高于此阈值的网格连接起来,便可形成排水网络。当阈值减少时,网络的密度便相应增加。

如同求每个网格的流向一样,河网同样从流域的出口开始向上游搜索。水流累积值最大的点即是流域的出口,该点可以标记为 1 号河网的起点,找流入该点的所有网格,如果其水流累积值大于阈值则加入河网中,如此直至某一个网格有一个以上水流累积值大于阈值的入流网格,或没有水流累积值大于阈值的入流网格为止。如果有两个或两个以上水流累积值大于阈值的入流网格,则表示该编号的河道结束,让每个水流累积值大于阈值的入流网格开始新的河道编号。如果没有水流累积值大于阈值的入流网格,则表示该段河道结束。当所有编号的河段的最后一个网格都没有水流累积值大于阈值的入流网格时,表示河网提取完毕。

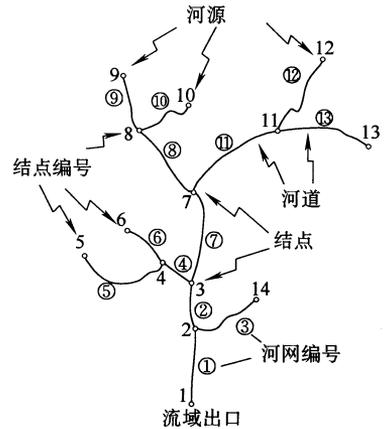


图 3 河网编号^[12]

以下给出河网编码及提取具体步骤:(1)设置一个存储河网的二维数组 $Wnet(i, j)$ (i 表示河网的编号, j 表示第 i 号河网所包含的网格, $Wnet(i, j)$ 中存储的是网格编号),设置数组 $NetFlowD(i)$ 存储每条河段的流向;(2)设定一个阈值(阈值大小在 1 与 DEM 网格总数之间);(3)通过流向确定每个网格的上一级入流网格;(4)找出流域的出口(水流累积值最大的网格);存入 $Wnet(1, 1)$ 与 $Wnet(1, 2)$ 中;认为是第 1 条河道的起点;(5)对 $Wnet(i, j)$ ($j > 1$) 存储的网格进行搜索,在所有流入 $Wnet(i, j)$ 的上一级网格中找出水流累积值大于阈值的网格,若这样的网格唯一则 j 加 1,并将该网格存入 $Wnet(i, j)$ 中,如果不唯一,表示此处是河道的分叉点,有多条河道从此处汇入主河道,则主河道搜索完毕,依次将 i 加 1,产

生新河道,新河段的流向值均是主河道编号,前面确定的水流累积值大于阈值的多个网格即是多条新河道的起点,并将主河道最后一个网格存入新河道 $W_{net}(i,1)$ 中, $W_{net}(i,2)$ 存储新河道的起点;(6)重复步骤(5),当所有河段的最后一个网格都没有水流累积值大于阈值的入流网格时,即可定出河网。

按照以上步骤生成的河网将以河段的形式存储于 $W_{net}(i,1)$,将各个河段连接将产生河网。从步骤(5)中可以看出由于是逐级向上游搜索的,所以生成的河网一定是连续的。并且每条河段之间通过流向是存在拓扑关系的。

2.4 子流域的划分 子流域的确定分两步进行。第1步在河道的基础上进行初步的划分,第2步要对第1步产生的很小的子流域进行合并。

首先要给出子流域大小的阈值,该阈值同河网的阈值意义相同。通过这个阈值按照上面的方法即可定出有编号的河网。初步的子流域即是每段河网的流入区域。这样定出来的子流域可能因为河段较短而出现很小的子流域,下一步就是将这些小流域进行合并。流域合并的方法很多,最容易实现的是合并到它流入的那个子流域。如果要使子流域的形状尽可能的成为凸边形,最好合并到其相邻的子流域。

具体实现步骤如下:(1)设定一个阈值;(2)通过流向确定每个网格的入流网格;(3)按照该阈值确定河网 $W_{net}(i,j)$;(4)从第1条河段开始,依次搜索所有河段的起点,能够流入到河段起点的所有网格都编上该河段的号。如第1条河段的起点是流域的出口,流入出口的网格是全流域,则给全流域的网格都标上1。再找第2条河段起点,所有能够流入该点的网格编号由1变成了2,如此直至所有的河段结束,就可以给每个网格按照河段编上了子流域号,每条河段的流向即是子流域的流向;(5)结束步骤(4)后很容易出现面积很小的子流域,所以要计算出子流域的面积,如果存在面积小于阈值的子流域将其编号改为其流入子流域的编号,排在其后面的子流域编号减1,子流域流向依次修改。如此即可保证所有子流域的面积都大于阈值。(6)子流域的边界的确定,将每个子流域单独提出,邻居个数小于8个的网格即为子流域的边界。

此处的子流域是根据河道来定出的,更符合水文学的思想,方便水文模型的计算,提高水文模型的模拟精度。子流域之间通过子流域的流向确定了拓扑关系。

3 应用实例

将该法应用于全黄河流域、泾河流域以及海河流域内的白河流域,提取的河网如下(DEM精度是 $1\ 000\text{m} \times 1\ 000\text{m}$)。

3.1 黄河流域 黄河是中国的第二大河。发源于青海高原巴颜喀拉山北麓约古宗列盆地,蜿蜒东流,穿越黄土高原及黄淮海大平原,注入渤海。干流全长 $5\ 464\text{km}$,水面落差 $4\ 480\text{m}$ 。流域总面积 $79.5\ \text{万}\ \text{km}^2$ (含内流区面积 $4.2\ \text{万}\ \text{km}^2$)^[10]。

全黄河流域 DEM 网格总数为 795 049。产生的河网给出 $1\ 000\text{km}^2$ 的阈值,产生河网的条数是 415,最长河段为 353km ,最短河段长是 5km 。子流域的产生给出的阈值是 $5\ 000\text{km}^2$,可以将黄河流域划分为 64 个子流域,最小子流域为 $5\ 011\text{km}^2$,最大是 $37\ 075\text{km}^2$ 。河网图见图 4~图 7。

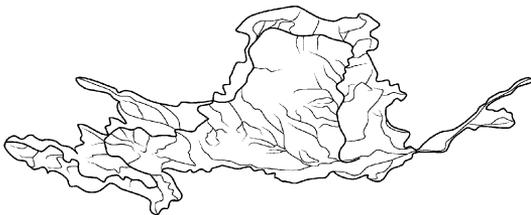


图 4 黄河流域河网(实测)¹

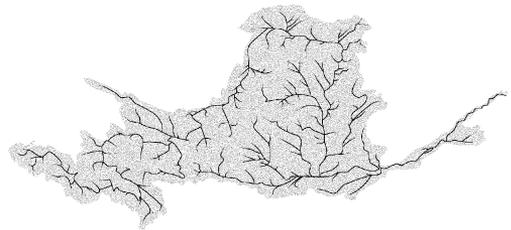


图 5 黄河流域河网(AEDNM 计算结果)

黄河流域是一个多沟壑的流域^[11],这给自动提取河网带来了很大的难度。从图 6 中 Arc View 的计算结果可以看出,传统的方法提取的河网多处出现间断,并且与图 4 的实测河网比较差别很大。图 5 中

泾河是作为黄河流域内的一个典型流域来研究的。从图 10、图 11 的对比结果可知 ,AEDNM 与 Arc View 的结果基本一致 ,同实测河网差别也很小。可以看出 AEDNM 仍然继承了传统方法的优点。提取的河网比实测河网中河道多 ,原因是给的阈值较小。

3.3 白河流域 白河发源于河北省沽源县 ,经赤城县、于白河堡进入北京市延庆县境内 ,东流经怀柔县青石岭入密云县 ,沿途有黑河、汤河、白马关河等支流汇入 ,在张家坟附近注入密云水库^[14]。

白河流域 DEM 网格总数为 36 134。产生的河网给出 100km^2 的阈值 ,产生河网的条数是 181 ,最长河段为 50km ,最短河段长是 2km。子流域的产生给出的阈值是 $1\ 000\text{km}^2$,可以将白河流域划分为 14 个子流域 ,最小子流域为 $1\ 008\text{km}^2$,最大是 $6\ 723\ \text{km}^2$ 。见图 12 ~ 图 15。

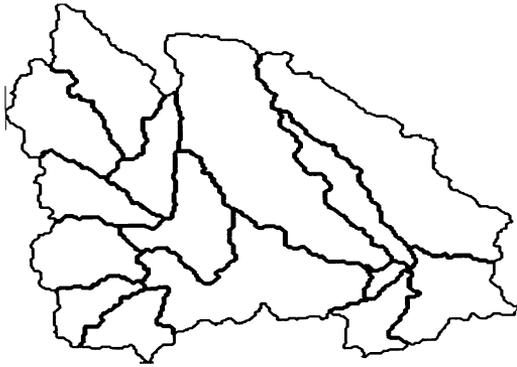


图 12 白河流域子流域(AEDNM 计算结果)



图 13 白河流域河网(实测)



图 14 白河流域河网(AEDNM 计算结果)

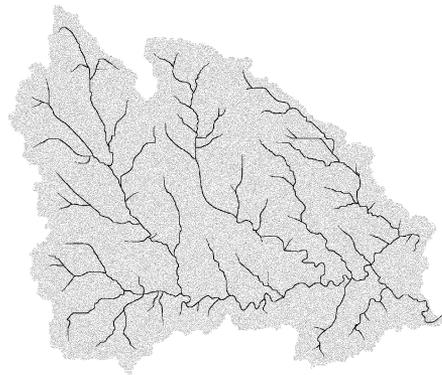


图 15 白河流域河网(Arc View 计算结果)

从图 12 可知 ,本文提出的划分子流域是基于水文学思想的。子流域的分界点基本是河道的交点 ,子流域的边界处于山脊上。

白河位于华北平原 ,流域平均高程 $1\ 124\text{m}$,高程变化范围从 $130 \sim 2\ 262\text{m}$,水土流失较少 ,沟壑很少。提取的河网同实测河网吻合的很好。从图 13、图 14 的对比可发现 :主干的河道中的弯曲能够模拟出来 ,各大支流完全没错。

4 结语

从上面的应用结果可以看出 ,本文提出的 AEDNM 对于任何类型地形的 DEM 都能够提取出连续的

白河实测站网源于海河流域水文年鉴。

河网,无须对 DEM 进行填洼处理。而 Arc View 中传统方法必须对 DEM 进行填洼,填洼后的 DEM 提取的河网也很难保证是连续的,如有很多沟壑的黄河流域^[11],不管怎样填洼,Arc View 提取的河网也有间断,填洼严重后产生大片的平地,还产生了平行河网。因此本文提出的 AEDNM 法较传统的方法要优。

AEDNM 比传统方法优,在于其结合了图论与水文学的思想,不对 DEM 进行填洼处理,而是从流域的出口逐级向上游搜索来得到河网。该法的优点有:(1)提取的河网保证是连续的;(2)避免了填洼带来大片平地导致提取的河网平行;(3)遇到洼地时采取的从洼地边最低的点出流,这样即符合实际河网的特色也很好的解决了洼地问题;(4)河网的编号采取了逐段编号的方式,与以往的等级编号有所不同,该编号简单易行,更方便了对划分的子流域进行编号;(5)根据提取的河网划分子流域更符合实际中的流域特色,也方便水文模型的计算。

由 DEM 直接提取河网大大减少了人类大量的机械劳动,提取的河网同实际的误差也很小,完全能够满足水文模拟与生产的需要,尤其对于研制与开发分布式水文模型具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] 孙凡哲,芮孝芳. 数字高程模型在流域水文模型应用中的若干问题[J]. 水文,2002,22(5):1-4.
- [2] Lawrence W M, Jurgen Garbrecht. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method [J]. Journal of hydrology. 1995,167:393-396.
- [3] O'Callaghan F, Mark DM. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. Computer Vision Graphicc and Image Processing. 1984,28:323-344.
- [4] 周贵云,刘瑜,邬伦. 基于数字高程模型的水系提取算法[J]. 地理学与国土研究,2000,16(4):77-81.
- [5] 任立良,刘新仁. 数字高程模型在流域水系拓扑结构计算中的应用[J]. 水科学进展,1999,10(2):129-134.
- [6] Lawrence W M, Jurgen Garbrecht. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM [J]. Computers & Geosciences 1999,25,835-844.
- [7] Martz W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage Network and subcatchment Areas from digital elevation models [J]. Computers & Geosciences. 1992,18(6):747-761.
- [8] Jurgen Garbrecht, Lawrence W M. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models [J]. Journal of hydrology. 1997,193:204-213.
- [9] Jurgen Garbrecht, Lawrence W M. Automated Channel Ordering And Node Indexing For Raster Channel Networks [J]. Computers & Geosciences. 1997,23(9):961-966.
- [10] 黄河网: <http://www.yellowriver.gov.cn/lib/dhgl/2002-12-29/ij.14335425658.html>
- [11] 阎国年,钱亚东,陈钟明. 黄土丘陵沟壑区沟谷网络自动制图技术研究[J]. 测绘学报,1998,27(2):131-137.
- [12] 冉大川,刘斌,罗全华,等. 泾河流域水沙变化水文分析[J]. 人民黄河,2001,23(2):9-11.
- [13] 王小艳,高建恩,安梦雄. 泾河水沙基本特性分析[J]. 西北水资源与水工程,2001,12(3):21-24.
- [14] 王纲胜,夏军,谈戈,吕爱峰. 潮河流域时变增益分布式水循环模型研究[J]. 地理科学进展,2002,21(6):573-582.

Drainage network extraction and subcatchment delineation based on digital elevation model

YE Ai-zhong¹, XIA Jun^{1,2}, WANG Gang-sheng², WANG Xiao-ni¹

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, China)

Abstract: An automatic extraction method for drainage network is proposed. This method differs from the traditional methods in the approach of dealing with the sink-filling problem. It determines the flow direction by searching upward from the catchment outlet and form a directed but non-loop graph based on the idea of combining the graphic theory with hydrology. The proposed method guarantee that the generated river network is continuous and the sizes of the delineated subcatchments are homogeneous. The examples of application indicate that this method is simple and practical.

Key words: digital elevation model (DEM); drainage network; subcatchment; flow direction; graphic theory; hydrology
(责任编辑:王成刚)