

文章编号: 1004-8227(2004)04-0343-06

GIS 环境下基于 DEM 的中国流域自动提取方法

徐新良, 庄大方, 贾绍凤, 胡云峰

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 应用地理信息系统平台, 建立基于水文站网和水资源信息的空间化水循环数据库是研制开发全国水循环信息管理系统的关键和基础, 为了与全国水文站网的观测资料相匹配, 水循环数据库的结构将按流域组织, 因此快速、有效地自动提取全国流域是所有工作进展的前提。为了从数字高程数据中自动提取全国流域, 以提高基于 GIS 的全国水资源信息获取的效率, 从 DEM 的特性出发, 提出了一种从 DEM 中自动提取全国流域的实用方法。该方法利用 1:25 万 DEM 数据, 首先将全国流域划分为 14 大流域片, 并在每一流域片内分别提取流域。提取过程如下: 首先对 DEM 数据进行填洼和削峰, 然后确定每个栅格单元的水流方向, 再根据各栅格单元的水流方向, 计算出每个栅格单元的汇流能力, 根据汇流能力采用阈值法确定河流网络, 最后通过河流网络和流域出水口, 快速识别出所有子流域。另外, 还给出了利用 GIS 软件 ARC/INFO GRID 提取全国流域的 AML 程序代码, 并以海河流域作为实验区将抽样测量结果和自动提取结果进行了实验对比分析, 其结果表明利用该方法提取的流域数据与利用手工方法绘制的流域基本一致, 证明该方法是有效的。

关键词: 水文; 流域; 数字高程模型(DEM); 地理信息系统(GIS); 自动提取

文献标识码: A

21 世纪以来, 随着社会经济的发展, 水资源短缺问题已经成为人们日益关注的焦点, 深入了解水资源的空间分异格局以及时空演变规律, 挖掘水资源的潜力, 充分利用和合理调配水资源是今后流域管理的重点。“3S”技术的引进, 为水文科学注入了新的血液, 尤其是 GIS 在数据管理、空间分析及可视化显示和制图等方面的卓越功能, 已使目前水文模型研究的重点从流域统计模型转到 GIS 与成熟水文模型相结合的分布式水文模型的研究方面^[1,2]。

运用 GIS 中栅格系统的空间分析方法来提取水系, 研究地表水文特性, 国内外在这方面已开展了大量的工作^[3~9]。本文利用 GIS 软件 ARC/INFO 的地表水文分析模块, 在 1:25 万 DEM 的基础上, 通过模拟水流方向、流域汇流能力、河网的自动生成、流域出水口的确定、子集水区边界的划分来提取全国面积大于 100 km² 的所有流域。该项工作是建立全国水循环信息系统的数据库基础, 也是进一步探讨中国流域空间分布特征和时空变异的关键。

1 从 DEM 提取流域的算法基础

DEM 是数字高程模型的英文简称(Digital Elevation Model)是流域地形、地物识别的重要原始资料。DEM 的原理是将流域划分为 m 行 n 列的四边形(CELL), 计算每个四边形的平均高程, 然后以二维矩阵的方式存储高程。由于 DEM 数据能够反映一定分辨率的局部地形特征, 因此通过 DEM 可提取大量的地表形态信息, 这些信息包含流域网格单元的坡度、坡向以及单元格之间的关系等^[7]。同时根据一定的算法可以确定地表水流路径、河流网络和流域的边界。因此从 DEM 提取流域特征, 一个好的流域结构模式是设计算法的前提和关键。本文采用 1967 年 Shreve 描述的流域结构模式^[8], Shreve 使用一个具有一个根的树状图来描述流域结构(如图 1 所示)。

该结构主要包括两部分: 结点集和界线集。河流网络中的每一段沟谷都有一个汇流区域, 这些区

收稿日期: 2003-04-14; 修回日期: 2003-08-06

基金项目: 中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程“中国水循环信息系统开发研究”项目(CXI0G-E01-08-01)资助。

作者简介: 徐新良(1972~), 男, 山东省青岛人, 博士生, 主要从事地图学与地理信息系统的应用研究。

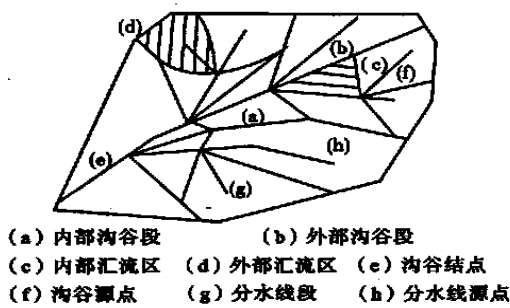


图 1 Shreve 流域结构模式图

Fig. 1 Drainage Structure

域由流域分水线集来控制。外部沟谷段有一个外部汇流区,而内部沟谷段有两个内部汇流区,分布在内部沟谷段的两侧。整个流域被分割成一个个子流域,每个子流域好象是树状图中的一片“叶子”。Shreve 的树状图流域结构模式给出了沟谷网络、分水线网络和子汇流区的定义,成为设计流域特征提取的基础。

从 DEM 中提取流域,关键是分水线网络的确定,本文基于径流漫流模型,通过模拟地表径流的流动来产生水系,进而确定分水线,划分出流域。这种方法最初由奥克拉芳 (O' callaghan) 和马克 (Mark) 两人于 1984 年提出^[9], 主要根据 DEM 栅格单元和八个相邻单元格之间的最大坡度来确定水流方向,计算每个单元格的上游汇流能力。然后确定一个汇流能力阈值,不低于该阈值的单元格标记为水系的组成部分。该方法简单,直接产生连续的流线段。由于它模拟地表径流有一定的模型基础,因而被认为是较好的方法。本文主要基于这种方法来设计提取全国流域的技术路线。

2 DEM 的生成及预处理

为保证全国流域提取的精度,本文采用 1:25 万地形图建立地面分辨率为 100 m 的栅格 DEM。过程如下: (1) 数字化 1:25 万地形图中的等高线属性,

建立地形等高线数字化矢量图; (2) 建立空间拓扑关系和地图投影坐标系统,采用双标准纬线等面积割圆锥投影,中央经线为 105° E, 双标准纬线分别为 25° N 和 47° N, 采用 KRASOVSKY 椭球体; (3) 采用三角化不规则网 (TIN: Triangulated Irregular Network) 方法,将矢量等高线图转成 TIN 数据结构,并进行空间插值; (4) 将 TIN 数据结构转换成格网结构 (Lattice); (5) 对格网数据进行重采样,建立 100 m 分辨率的 DEM 数据。

本研究充分利用了中国资源环境数据库^[10-11]中 1:25 万 DEM 数据。该数据是按省级行政边界进行分割的,数据量约 30G,由于数据量巨大,不可能在全国范围内提取流域,我们采取按一级流域分割然后在每一个一级流域内分别提取大于 100 km² 子流域的操作流程进行。对 100 m 分辨率的分省 DEM 数据进行重采样生成 1 km 分辨率的 DEM 数据,并合并成 1 km 分辨率的全国 DEM 数据,为下一步在全国范围内提取一级流域奠定基础。

从 DEM 提取流域界线,首先要对地形中的洼地 (Sink) 和尖峰 (Peak) 进行处理,洼地和尖峰 (如图 2) 的存在使得在计算水流方向时会出现水流逆流的情况,给水流线的跟踪和流域界线的确定带来困难。处理时我们采用 ARC/INFO GRID 模块下的 FILL 命令来填洼和削峰。该过程由计算机扫描 DEM 矩阵来确定洼地和尖峰单元格。洼地单元格指相邻 8 个单元格高程都不低于本单元格高程的单元格,尖峰单元格指相邻 8 个单元格高程都不高于本单元格高程的单元格,当遇到洼地和尖峰单元格时就用最临近单元格的值来替代 (如图 2 所示)。

3 水流方向的确定

地表径流在流域空间内总是从地势高处向地势低处流动,最后经流域出口排出流域。为了准确地划定流域界线,首先要确定水流在每个栅格单元格

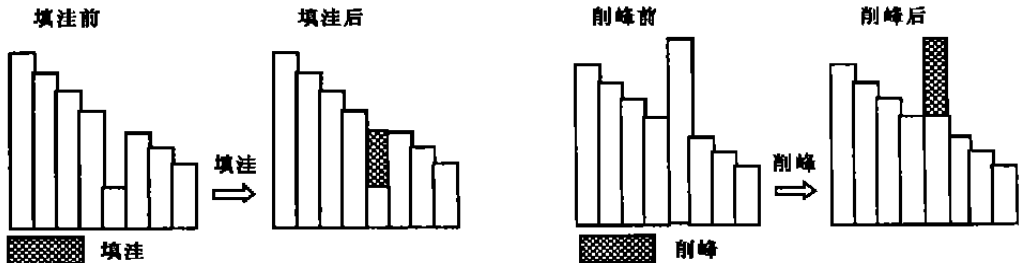


图 2 填洼和削峰过程示意图

Fig. 2 Process of Filling Sinks and Removing Peaks

内的流动方向。我们采用 ARC/INFO GRID 模块中的 FLOWDIRECTION ()函数来确定水流方向。栅格单元格的水流方向是指水流流出该单元格的方向。对于空间内某一栅格单元格,与其相邻的共有 8 个单元格(水平、垂直和对角线)。FLOWDIRECTION ()赋予每个单元格一位位于 1~255 之间的整数值来表示水流方向。从中心单元格开始,周围相邻 8 个单元格的水流方向如图 3 所示。其中 1: 东; 2:

东南; 4: 南; 8: 西南; 16: 西; 32: 西北; 64: 北; 128: 东北。除上述数值之外的其他值代表流向不确定。这主要由 DEM 中“洼地”和“平地”现象造成的,“平地”指 8 个单元格具有相同的高程,与测量精度、DEM 单元格的尺寸和研究区的地形有关。如果某一单元格的值低于其周围 8 个单元格的值, FLOWDIRECTION ()函数则用 8 个单元格中的最小值来代替。流向分析过程如图 3 所示。

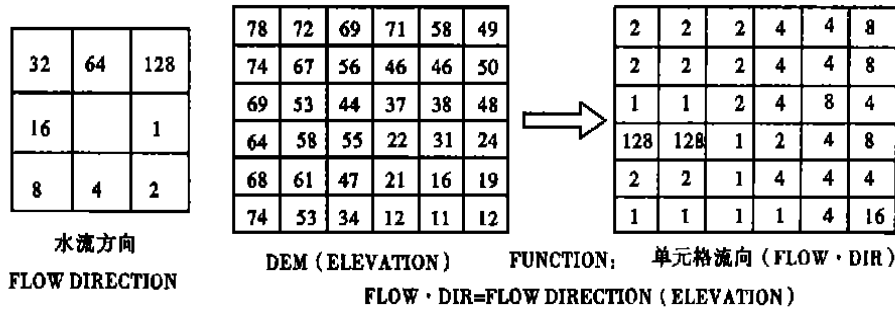


图 3 水流方向及流向分析示意图

Fig. 3 Flow Direction and the Process of Analyzing on Flow Direction

4 流域汇流能力分析

流域汇流分析的主要目的是确定河流网络,进而在河流网络的基础上确定流域边界即分水线。ARC/INFO GRID 下的 FLOWACCUMULATION ()函数通过确定所有流入本单元格的累积上游单元格数目来生成流域汇流能力栅格图(如图 4)。算法从每个栅格单元格出发依次扫描水流方向矩阵 (FLOWDIRECTION ()的运行结果),沿水流方向追踪直到 DEM 边界。当整个水流方向矩阵扫描完毕,就可以得到流域汇流能力的栅格分布图,汇流栅格上每个单元格的值代表上游汇流区内流入该单元格的上游栅格单元格的总数 (NIP), NIP 值较大者, 可视 为 河 谷, NIP 值 等 于 零 则 是 较 高 的 地 方, 可 能 为

络的生成是提取流域边界中关键的一步,可以通过设置 NIP 阈值来确定河流网络,大于 NIP 值的单元格为沟谷线上的点,连接各个沟谷线上的点就形成了河流网络。

5 一级流域及子流域的生成

由于拼接后的全国 1 :25 万 100 m 空间分辨率的 DEM 数据量巨大,不可能直接在上面提取全国所有子流域,因此我们采取按一级流域分割然后在每一个一级流域内分别提取所有子流域的方法。一级流域的提取是在全国 1 km DEM 基础上进行的,直接利用 ARC/INFO GRID 下的 BASIN ()函数在水流方向栅格的基础上产生全国一级流域, BASIN ()函数通过识别流域分水岭来划分流域,在全国 1 km DEM 基础上生成的全国一级流域空间分布如图 5 所示。国家重点科技攻关项目 97-759-06 课题,子专题“全国水资源综合数据库空间集成”(中国水利水电科学研究院承担)的研究成果将全国划分为九大流域片(如图 6),通过与利用上述技术提取的全国一级流域对比分析发现,在 1 km DEM 基础上生成的全国一级流域界线与 97-759 的研究成果吻合性很好。为下一步提取子流域的方便,我们参照 97-759 的研究成果,将全国划分为 14 个流域片(如图 7),其中长江流域片和内陆河片因空间范围

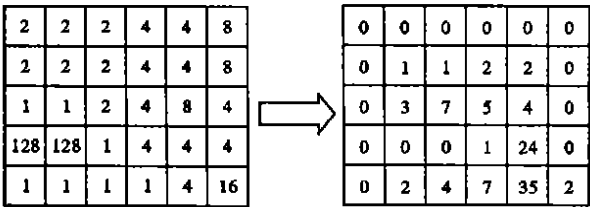


图 4 流域汇流分析示意图

Fig. 4 Analysis on Flow Accumulation

流域的分水岭。流域汇流能力栅格分布图产生后就可以方便地提取流域的各种特征参数。其中河流网

广大, DEM 数据量巨大, 直接在上面提取所有子流域有一定困难, 因此将其再次分割为两片; 台湾和海南直接作为两个较小的流域片在上面提取子流域。子流域提取的过程如下: 从河谷单元或孤立的

洼单元开始, 向上游搜索所有流向该单元的单元, 这些单元构成以开始单元为流域出口的子流域。因此提取子流域的第一步是确定所有的流域出口, 我们利用 STREAMLINK () 函数来确定流域出口, STREAMLINK () 函数利用上面建立的河流网络, 将河流沟谷交叉点自动标记为流域出口。流域出口找到后, 利用 WATERSHED () 函数在水流方向栅格上可以很方便地确定所有子流域 (如图 8)。整个提取流程如图 9 所示, 提取过程充分利用了 GIS 软件 ARC/INFO GRID 中的水文分析模块, 为了进一步提高操作的自动化程度, 我们设计了全国流域提取的 AML 程序, 有关程序代码如下:

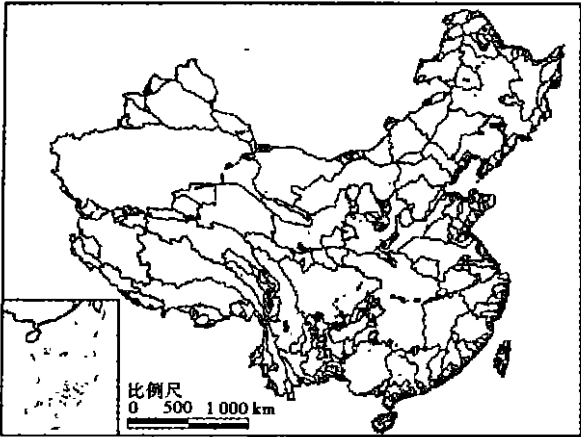


图 5 全国一级流域空间分布图
Fig. 5 First Grade Drainage of China

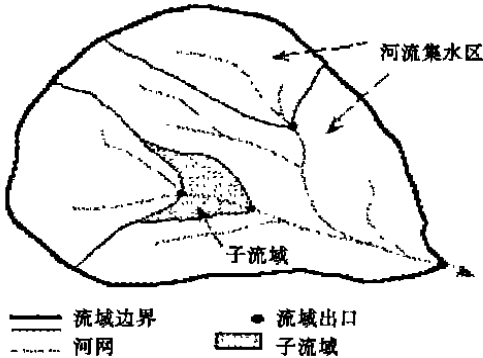


图 8 子流域地确定
Fig. 8 Identify the Sub-drainages

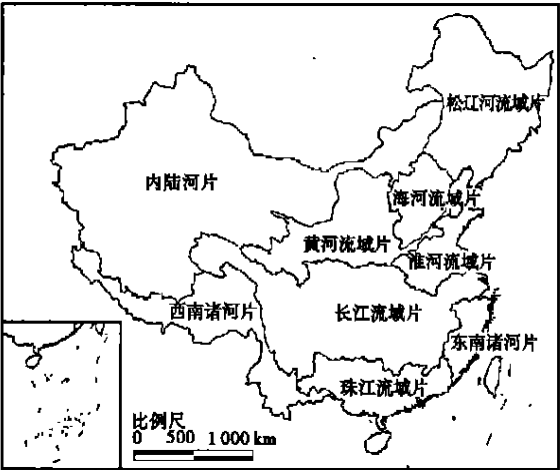


图 6 全国九大流域片分布图
Fig. 6 9 Drainages of China

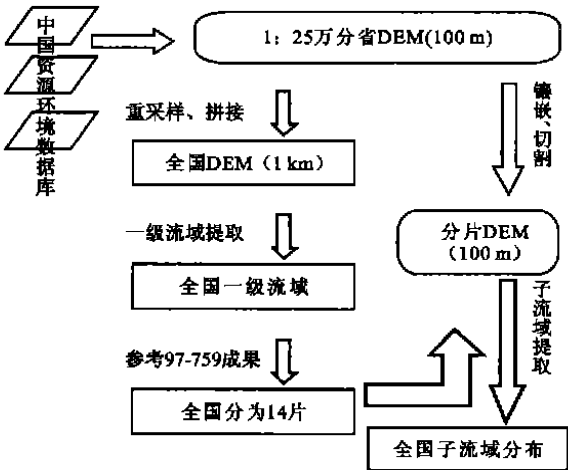


图 9 基于 DEM 的中国流域提取操作流程
Fig. 9 Process of Extraction Drainages in China Based on DEM

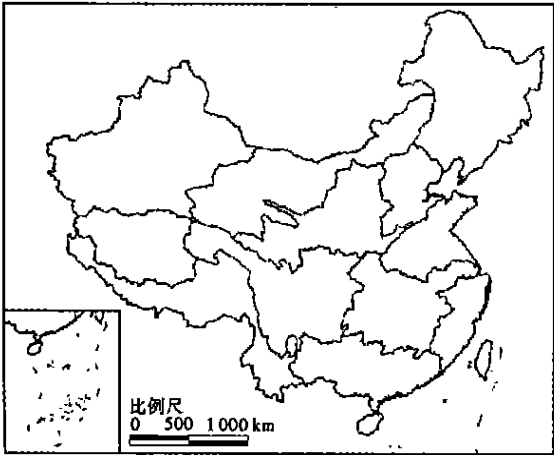


图 7 全国 14 大流域片分布图
Fig. 7 14 Drainages of China Divided by DEM

GRID / * 切换到 ARC/INFO GRID 模块
FILL dem1 dem1-f sink /* 填洼
FILL dem1-f dem-f peak /* 削峰
dem-dir = FLOWDIRECTION (dem-f)
/* 建立水流方向栅格
dem-a = FLOWACCUMULATION (dem-dir)

```
/*产生流域汇流栅格
dem-b1 = BASIN(dem-dir) /*确定一级流域边界
dem-net = CON(dem-a> 10 000, 1) /*确定河流网络
dem-out = STREAM LINK(dem-net, dem-dir)
/*产生流域出水口
dem-b2 = WATERSHED(dem-dir, dem-out)
/*确定子流域边界
dem-b = SELECT(dem-b2, 'count'> 10 000)
/*选择大于 100km2的流域
dem-bc = GRIDPOLY(dem-b)
/*将流域GRID 转换为 COVERAGE
```

将程序代码中的 dem1 替换成分割后的 14 大流域片,运行上述代码,计算机便能自动提取出每一流域片中大于 100 km²的所有子流域,图 10 所示为提取的中国流域的一部分——海河流域片局部地区子流域空间分布图,将提取的各流域片的流域分布图进行拼接,并建立拓扑关系,可进一步分析流域面积、空间分布等各种流域特征。

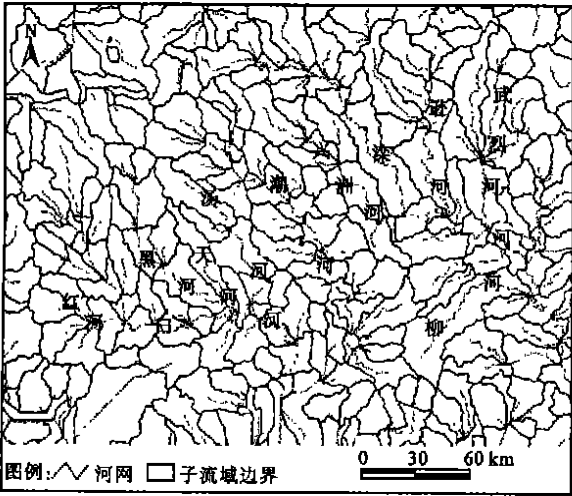


图 10 海河流域片局部地区子流域空间分布
Fig. 10 Distribution Map of Part of Haihe Drainage

6 精度检验及误差分析

为了进一步检验自动提取的流域与实际流域之间的误差,我们选择海河流域作为实验区,将该地区的河网、流域分布图进行扫描,并通过几何纠正配准到同一投影坐标系下,与利用 DEM 自动提取的河网、流域分布图进行空间对比分析,发现二者吻合性很好。为了进一步分析误差大小,我们随机选取了海河流域中的十几个子流域,统计自动提取的子流域面积并与实际量测结果进行比较分析,对比结果如表 1,发现自动提取的流域面积与实际流域面积

非常接近,尤其是在山地丘陵区效果比较好,精度也比较高,误差仅为几平方米;但在地形平坦地区,由于算法并没有考虑随机因素对河流的影响,提取的水系一般比较平直,而实际的自然水系往往弯弯曲曲,几乎是随机地流过平原区,这就给流域的分布和面积量算带来一定的误差。但从总体上考虑在中国这样大的空间范围内利于 1 :25 万 DEM 数据自动提取全国流域,无论从工作效率还是数据精度来看都是可行的。

表 1 自动提取流域面积与量测流域面积的比较

Tab. 1 Comparison Between Automated Extraction

Area and Surveyed Area		
子流域名称	自动提取流域面积(km ²)	量测流域面积(km ²)
黑河(至三道营水文站)	1 663. 960 0	1 600
白河(至云州水库水文站)	1 197. 199 0	1 170
白河(至密云水库水文站)	9 123. 242	9 072
潮河(至大阁水文站)	1 916. 828 0	1 850
潮河(至下会水文站)	5 456. 171 6	5 340
潮河(至罗庄子水文站)	416. 423	322
怀河(至怀柔水库水文站)	492. 108	526
怀河南支(至前辛庄水文站)	334. 214	332
怀河北支(至口头水文站)	157. 894	155
青龙湾减河	2 916. 754	2 850
北运河(至土门楼水文站)	2 964. 126	2 850
凉水河(至榆林庄水文站)	686. 33	684

* 量测流域面积数据来源于中华人民共和国水文年鉴, 1986 年第 3 卷《海河流域水文资料》。

7 结论

DEM 在水利科学方面的应用,其突出优势是描述流域地形,包括流域边界、坡度、坡向、河网识别等。从目前利用 DEM 提取流域特征的现状来看,国内外更多的研究是侧重于局部小流域的实验和探索。本文实现了在中国广大的空间范围内快速提取流域的全过程,为实现全国范围内流域空间特征与站点观测数据的综合管理、分析,以及水文水资源信息的空间可视化浏览、查询、统计分析和水文模型的应用分析奠定了基础。GIS 环境下基于 DEM 的流域特征自动提取避免了编写程序代码的复杂过程,节省了大量的人力、物力。从提取效率和数据精度两个方面来看都是切实可行的。目前利用 DEM 提取流域特征的技术正在不断的发展和完善中,未来

利用 DEM 提取流域特征的精度, 尤其是在平坦地区的提取精度定会有进一步的提高。

参考文献:

[1] 顾用红, 舒振文, 张火青. DEM 在流域水文特征分析中的应用 [J] . 人民珠江, 2001, (4): 5 ~ 6, 38.

[2] 王中根, 刘昌明, 左七亭, 等. 基于 DEM 的分布式水文模式构建方法 [J] . 地理科学进展, 2002, 21(5): 432 ~ 439.

[3] Jenson S K. Application of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models [J] . Hydrological Process, 1991, (5): 31 ~ 44.

[4] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez Iturbe I. On the extraction of channel network from digital elevation data [J] . Hydrological Processes, 1991, (5): 81 ~ 100.

[5] 梁天刚, 张胜雷, 戴若兰, 等. 基于 GIS 栅格系统的集水农业地

表产流模拟分析 [J] . 水利学报, 1998, (7): 26 ~ 29.

[6] 陈永良, 刘大有, 虞强源. 从 DEM 中自动提取自然水系 [J] . 中国图象图形学报, 2002, 7(1): 91 ~ 96.

[7] Band L E. Topographical partition of watersheds with digital elevation models [J] . Water Resources Research, 1986, (2): 15 ~ 24.

[8] Shreve R L. Infinite topologically random channel networks [J] . Journal of Geology, 1967, 75: 178 ~ 186.

[9] O' callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage of networks from digital elevation data [J] . Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28: 323 ~ 344.

[10] 刘纪远主编. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究 [M] . 北京: 中国科学技术出版社, 1996.

[11] 庄大方, 刘纪远, 刘明亮. Research activities on land use /land cover change in the past ten years in china, use space technology [J] . 中国地理科学(英文版), 1999, 9(4): 330 ~ 334.

AUTOMATED EXTRACTION OF DRAINAGES IN CHINA BASED ON DEM IN GIS ENVIRONMENT

XU Xin-liang, ZHUANG Da-fang, JIA Sao-feng, HU Yun-feng
(Institute of Geographical Sciences and Nature Resources Research,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: It is an important key and foundation to set up a database of spatial water cycle based on GIS technology for developing water cycle information system. In order to match the observation data, the structure of database will be organized according to drainages. So automated extraction of the flow network and drainages is a premise of all other works. This paper puts forward a method that automatically extracts drainages in China from DEM data. This method used DEM data of 1 :250,000 scale, and firstly divided the DEM of whole country into 14 parts based on the drainages extracted from 1 km DEM data; secondly filled sinks and removed peaks in each part; thirdly identified the flow direction of each cell using flow direction () function; fourthly calculated the flow accumulation of each cell according to flow direction and identified the flow network by setting the threshold value; finally used the watershed () function to find out all the sub-drainages based on the flow networks and the watershed outlet. On the other hand, this article listed the AML code for automated extraction drainages from DEM data. Finally the authors checked the result of automated extraction using some surveyed data in Haihe drainage area. Through analysis on the comparison between the flow networks and drainage area that extracted using this method and surveyed data, it is concluded that this method is effective and efficient.

Key words: hydrology; drainage; Digital Elevation Model (DEM) ; Geographical Information System (GIS); automated extraction