

流域地形自动分割研究*

闫国年 钱亚东 陈钟明

(南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室 南京 210097)

摘 要 本文提供了基于栅格数字高程模型(DEM)提取流域空间结构,进行流域自动分割的技术方法。该方法包括地貌形态结构定义、流域结构定义和算法设计3个部分。基于本文设计的算法,可以从DEM提取完整的汇流网络和分水线网络,两者组成的多边形集把流域分割成具有拓扑结构的多个子汇流区,这个子汇流区集作为存贮流域信息的基本地貌单元,是流域信息进入地学数据库的框架,也是进行空间分布式机理——过程流域分析模型的基础。并以山西离石黄土丘陵沟壑区的王家沟流域为试验区,获得了较为满意的结果。

关键词 数字高程模型,地貌形态结构,流域结构,算法

1 引 言

直观、动态的遥感对地观测信息,已成为地理信息系统(GIS)最主要的信息源。遥感信息及其初步分析成果数据如何进入GIS数据库,如何转换为地学模型需要的数据,还有一些关键问题没有解决,其中包括地表特征的表达、定位、空间尺度、数据形式等问题。航空像片、SPOT数据、雷达数据和一些小卫星数据作为栅格DEM的主要数据源,记录了精确的空间三维定位信息,因此,解决好DEM数据中地貌形态结构的提取和表达,已成为解决上述问题的关键。

近年来,空间分布式机理——过程模型的发展得到了人们的重视。Moore^[1]等认为人类已进入“空间模拟”的时代。空间分布式地学模型的建立与应用,离不开地形信息,地形的起伏、坡度、坡向不仅决定了土壤的发育,植被的生长,控制着土壤水分,一定意义上还决定土地的利用方式。对一个小的汇流区,坡面的产流汇流与坡形有直接的关系;对一个流域,各子流域相互间的径流网络则决定着流域流出的过程。因此,流域的数字高程模型以及土地利用现状、植被覆盖、土壤类型等数据被看作是支持空间分布式模型的基本参数。

随着高精度DEM获取技术的发展和大规模DEM数据的应用,遥感和GIS、GIS和空间分布式模型技术接口成为一个急需解决的问题,本文的方法即提供了这样一个重要的技术接口。

2 栅格DEM和地貌形态结构

流域地形自动分割技术包括3个方面,(1)地貌形态结构定义,主要定义与栅格DEM对应的微地貌结构;(2)流域结构定义,定义能反映流域结构的特征地貌,它们是流域地形分割的界线;(3)基于上述定义设计流域地形分割算法。与其它空间数据结构相比,栅格结构的DEM数据在进行流域地形分割时有着它特殊的优越性^[2]。

2.1 栅格DEM

从地形图、航空航天立体像对等遥感图像中获取的,以空间分布的水平坐标 x, y 描述高程 z 或以经纬度描述海拔高程等数值形式存储的地表高程信息通常称为DEM。栅格DEM是把覆盖区域划分成规则网格,每个网格(点)的大小和形状都相同,用相应矩阵的行列号来实现网格(点)的二维地理空间定位,而矩阵元素则记录对应地面格网点的高程。栅格DEM数据实际上是一些离散点的高程数据。

本文选择典型黄土丘陵沟壑区山西离石王家沟小流域作为试验区,DEM数据是使用高分辨率扫描仪和全数字化测图系统对王家沟流域红外航片进行处理获得的,空间分辨率为 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 。

2.2 地貌形态结构定义

栅格DEM数据是一些离散点的高程数据,每一

*国家自然科学基金资助项目(编号:49471060)和国家教委留学归国人员基金资助项目。

收稿日期:1997-11-22;收到修改稿日期:1998-02-10

个数据本身并不能反映实际地表的复杂性。为了从DEM数据中综合得出研究区的地貌形态结构,必须对地表各组成部分及其相互关系进行明确、可操作的定义,定义好地貌形态结构是实现算法的前提条件。这种地貌形态结构的定义及相互关联必须表达出地表最富有意义的属性,这种属性应该有物理意义。

作者针对黄土高原丘陵沟壑地区的复杂地形,提出了一种简单且符合实际的定义方法^[3]。该定义把地表分为平地、洼地和坡地3种类型,其中平地分为台地、阶地和低洼平地;洼地分为孤立洼地和组合洼地,坡地是指一个格网;如果与周围地形相比有比其低地形格网,那么此格网为坡地上的格网。

3 流域结构和流域特征地貌

3.1 流域地貌系统

把流域作为一个系统,研究其中各要素相互联系相互作用的关系,能量的输入及耗散,物质的输移及地貌演化的整体过程时,该系统称为流域地貌系统。本项研究中基于流域地貌系统来定义特征地貌。一条大的入海河流是以河口海面高程为底界,分水岭为周围边界,河床为下界的系统。大河的一条支流也可以构成次一级的流域地貌系统,它的底界为汇流处大河水面高程,每一级的支流又构成更次一级的流域地貌系统。系统等级的划分视研究目的、对象等条件而定。

3.2 流域特征地貌

流域地貌系统中要素很多,有些要素是基本的,有些要素可以从其它要素中派生出来。从DEM中获取感兴趣的地貌要素应该反映出流域地貌的形态结构,并能够把整个流域分割成应用模型使用和能够构建信息系统框架的地貌单元,提供给应用模型使用。因此,这些要素应具备以下特征:

(1) 是流域地貌系统的主要构成要素,这些要素能派生出其他要素;

(2) 能够确定流域地貌系统及各个子系统的边界;

(3) 利用这些要素能构成空间分布式地貌模型、水文模型等数字地面模型的框架;

(4) 能够驱动物理模型,对整个流域系统中系统与环境之间物质和能量的交换过程进行动态分析、模拟和预测。

本文把符合这些条件的地貌要素称为特征地貌。沟谷是一种地貌形成过程,也是一种地貌侵蚀

形态。根据流域地貌系统的定义,分水线网络是流域地貌系统的上界,汇流网络是流域地貌系统的下界,两者一起构成流域地貌系统清楚的边界,也是对流域地貌系统划分层次的界线。因此,汇流网络和分水线网络共同构成了流域地形自动分割的基础,汇流网络的提取和分水线网络的提取成为流域自动分割技术最重要的两个部分。

3.3 流域结构定义

Shreve^[4]使用一个具有一个根的树状图来描述流域结构(图1)。在这个结构中,主要包括3个部分,为结点集、界线集和汇流区集。其具体内容包括以下几个概念:

沟谷线段:一条具有两侧汇流区的线段;

分水线段:一条具有两侧分流区的线段;

沟谷结点:两条或两条以上沟谷线的交会点;

分水线结点:两条或两条以上分水线线的交会点;

沟谷源点:沟谷的上游起点;

分水线源点:分水线与流域边界的交点;

内部汇流区:汇流区边界不包括流域部分边界的汇流区;

外部汇流区:汇流区边界包括流域部分边界的汇流区。

沟谷结点和沟谷源点共同组成一个沟谷结点集。所有的沟谷段组成沟谷段集,形成一个沟谷网络;所有的分水线段组成分水线段集,形成一个分水线网络。沟谷段集和分水线段集共同把流域分割成一个汇流区集。

沟谷段是最小的沟谷单位,沟谷段可以分为内部沟谷段和外部沟谷段。内部沟谷段连接两个沟谷结点,外部沟谷段连接一个沟谷结点和一个沟谷源点。同样地,分水线段是最小的分水线单位,分水线段可以分为内部分水线段和外部分水线段。内部分水线段连接两个分水线结点,外部分水线段,连接一个分水线结点和一个分水线源点。

汇流网络中的每一段沟谷都有一个汇流区域,这些区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水区,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,每个子流域好像是树状图上的一片“叶子”。

根据Shreve的流域结构图可以看出,在汇流网络和分水线网络之间存在着共轭关系,基于这个关系可以在汇流网络的基础上生成分水线网络。对这个关系描述如下:

(1) 对每个沟谷段,无论是外流沟谷段和内流沟谷段,必须有一个分水线集为它们形成一个或两个汇流区域。

(2) 在分水线图上所有的沟谷结合点同时被定义为分水线结合点,每个结合点有几条沟谷相交(1条主流和 $n-1$ 条支流),同时也发散出相等数目的分水线。这相当于把分水线图“锚”在了汇流网络图上。

(3) 分水线网络构成一个多边形集,每个多边形中的点汇流进一条沟谷。

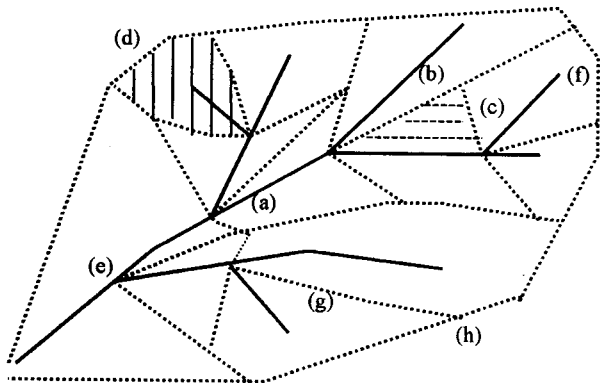


图1 流域结构模式图

(a) 内部沟谷段 (b) 外部沟谷段 (c) 内部汇流区 (d) 外部汇流区
(e) 沟谷结点 (f) 汇流源点 (g) 分水线段 (h) 分水线源点

Fig.1 Drainage structure

Shreve 的流域结构图给出了汇流网络、分水线网络和子汇流区的定义,明确表达了它们之间的相关关系,成为过去二十多年来学者们流域地形分割的基础,同样本文在进行流域地形自动分割时也使用了这样一个结构框架。基于这样的流域结构认识,利用栅格 DEM 进行特征地貌提取时,其中汇流网络和分水线网络是作为单格点宽的线状特征来提取的。

4 流域地形自动分割算法

4.1 算法说明

流域地形分割算法的目标是要将整个流域分割成为一个个子汇流区,算法分为以下 4 个部分:(1)提取汇流网络;(2)提取分水线网络;(3)延伸沟谷线到分水线,得到子汇流区集;(4)流域空间的拓扑编码。汇流网络的提取是整个流域分割算法的基础。基于正确的汇流网络,再利用汇流网络和分水线网络之间的共轭关系来提取分水线网络。每一条沟谷段都对应分水线网络构成的多边形集中的一个多边形,算法的第 3 步就是延伸沟谷段到相应的分水线,从而把该沟谷段的子汇流区分割成左右两个子汇流

区。流域空间的拓扑编码用来建立沟谷网络、分水线网络和各个子汇流区三者本身及其相互之间的拓扑关系,用作流域信息进入 GIS 和模型的框架。

对沟谷网络进行编码时,将使用一个结构来记录每一条沟谷段的信息,该结构如下:

```
struct channel
{
    int code;
    int r_down;
    int c_down;
    int r_up;
    int c_up;
    int type;
}
```

上述结构中,code 为沟谷段编码, r_down 和 c_down 用来记录沟谷段的上游结点的行列值, r_up 和 c_up 用来记录沟谷段的下游结点的行列值;type 用来记录沟谷段的类型,即该沟谷段是内部沟谷段还是外部沟谷段。 r_down 和 c_down 可能是内部结点,也可能是汇流源点。

4.2 算法步骤

算法的具体步骤如下:

汇流网络提取算法^[3]:

- (1) 搜索研究区所有的平地 and 孤立洼地;
- (2) 对台地和阶地进行蚕食处理;
- (3) 搜索得到组合洼地及其边界上所有的最低点(有时一个组合洼地的边界上有多个高程相等的最低点,如:水库的溢流坝),从中找到洼地的流出点;
- (4) 由组合洼地的流出点逆向搜索得到组合洼地内部的汇流路径;
- (5) 从流域出口开始搜索得到整个流域的流向和汇流网络。

汇流网络编码算法

(1) 沟谷结点编码。从流域出口开始搜索遍历整个汇流网络,对汇流网络中的每条沟谷段的上下游结点进行编码标识,标识值是沟谷段的编码值(code),该值是从流域出口开始沟谷段数的增量,同时记录这些结点的行列坐标(r_down , c_down 和 r_up , c_up)。

(2) 沟谷段编码。把沟谷段中的每个格点的标识值标识为沟谷段的标识值(code)。

(3) 记录沟谷段类型。根据该沟谷段所对应的上游结点的类型是内部结点还是沟谷源点,来判断

并记录沟谷段是内部沟谷段还是外部沟谷段。

分水线网络提取算法

(1) 标识子汇流区。递归搜索沟谷段中的每一点的流入点,把这些点的标识值赋为沟谷段的标识值。

(2) 标识分水线。搜索每一段沟谷对应的子汇流区的边界点,所有这些边界点组成该子汇流区的分水线。

(3) 提取分水线网络。对每一段沟谷重复上述两步,得到所有子汇流区的分水线,即构成整个分水线网络。

延伸外部沟谷段

(1) 记录汇流源点。从流域出口开始使用一个递归函数标识外部沟谷段的上游源点,对整个汇流网络扫描一遍后即得到所有的汇流源点。

(2) 计算汇流源点到分水线的汇流路径。计算汇流源点到达分水线的每条路径的长度,选择最长

的汇流路径来延伸外部沟谷段。

(3) 延伸外部沟谷段,根据上一步得到的最长路径对外部沟谷段进行延伸,即把该路径上的格点的标识值赋为它所属沟谷段的标识值。

构建流域拓扑关系

(1) 对延伸后的汇流网络重新编码,建立起汇流网络的拓扑关系;

(2) 对分水线网络进行编码,建立分水线网络的拓扑关系;

(3) 对子汇流区进行编码,建立起每条沟谷段与相应的两个子汇流区的拓扑关系。

5 离石王家沟的实例说明与分析

5.1 试验区选择

王家沟流域位于山西省离石县城北约4km,是



图2 离石王家沟数字高程模型(DEM)

Fig.2 The DEM of Wangjiagou, Lishi

三川河的主流北川河左岸的一条支流。流域面积9.1 km²;流域内部地面起伏变化大,从山顶到谷底相对高差 100—320m;侵蚀切割严重,沟壑纵横,沟谷密度达 7.01km/km²。王家沟小流域的地貌、土壤、植被、土地利用等条件在黄土丘陵沟壑区具有广泛的代表性。

5.2 成果分析

使用高分辨率扫描仪和全数字化测图系统对王家沟流域红外航片进行处理,获得 10m×10m 的 DEM 数据(图 2)。图 3 利用本文算法从试验区的栅格 DEM 中提取得到的汇流网络,图 4 利用本文算法提取的试验区分水线网络图,图 5 为汇流网络和分水线网络叠合图,图 6 和图 7 分别为把外部沟谷段延伸到分水线后得到的汇流网络图和流域地形分割图。

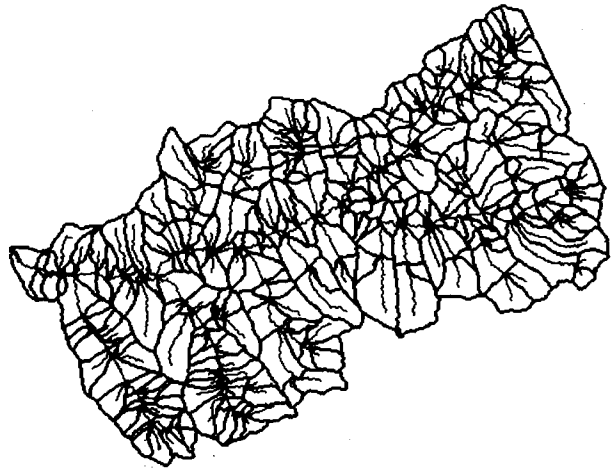


图5 离石王家沟地表汇流网络和分水线网络叠合图
Fig.5 The overlay of channel network and divide network of Wangjiagou, Lishi

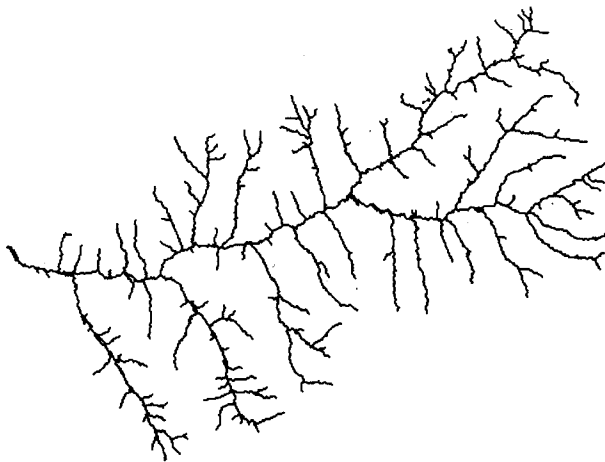


图3 离石王家沟地表汇流网络图(从DEM数据中提取)
Fig.3 The channel network of Wangjiagou, Lishi (Extracted from DEM data)

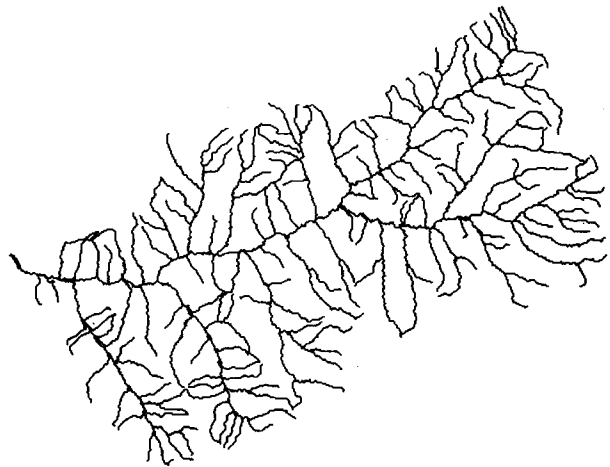


图6 离石王家沟地表延伸后的汇流网络
Fig.6 The channel network which has been extended of Wangjiagou, Lishi

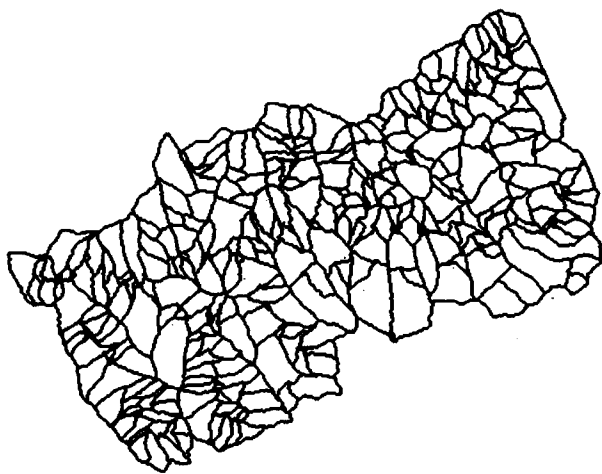


图4 离石王家沟地表分水线网络图
Fig.4 The divide network of Wangjiagou, Lishi

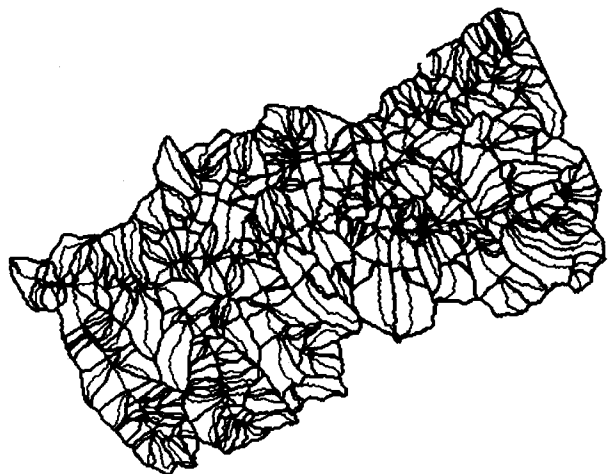


图7 离石王家沟流域地形自动分割图
Fig.7 Automated Topography Partition of Watersheds of Wangjiagou, Lishi

考察基于 DEM 提取的汇流网络(图 3)和分水线网络(图 4),可以发现两者具有密切的对应关系,即每一段沟谷都有一个分水线集组成的多边形与之相对应。对外部沟谷段进行延伸后,外部汇流区则同内部汇流区一样也一分为二,使得每个子汇流区具有较为统一的属性,如坡度、坡向等。

由于高精度 DEM 获取技术的发展,DEM 数据本身既具备了精确的定位特征,相应基于 DEM 获取的汇流网络、分水线网络以及基于这两个网络得到的子汇流区集也具备了同等精度的定位特征,这是从航空像片上目视解译或在地形图上勾绘所不具备的。

6 结论与建议

6.1 技术方法比较

传统的流域地形分割方法是以地形图作为数据源,手工提取沟谷网络和分水网络。地形图从测量到成图时间较长、更新慢,由此得到的结果现势性也较差。手工作业工作量大,效率低,要得到大范围内大比例尺的地表结构是很困难的。另外,手工获取特征地貌时,常常采用等高线的曲率作为定位沟谷上游源点的标准,但这个标准常常是模糊的,不确定的。提取沟谷网络是进行流域地形分割的基础,因此, Krumbein 和 shreve^[5]曾在同一张地形图上,使用相同的客观的标准,做了一系列的统计试验,得到不同的操作者测量得到的沟谷网络各项特性的变化情况。他们从这项试验中看到,不同的操作者测量得到的沟谷网络的长度和沟谷位置各不相同。因此,传统的流域地形分割方法无论是从精度上还是效率上都存在严重的不足。

本文从地貌形态结构定义、流域结构定义和算法设计 3 个方面,对流域地形自动分割的技术与方法进行了探讨,提出了基于栅格数字高程模型(DEM)提取流域空间结构,进行流域自动分割的基本方法,并设计了算法,在进行离石王家沟流域的地形自动分割过程中取得了满意的成果。本文提出的流域自动分割技术具有以下优点:

1. 高精度定位。随着具备高精度定位特征的 DEM 获取技术的发展,以此作为数据源提取得到的特征地貌和地貌结构也同时具备了高精度的定位特征。

2. 快速高效。利用本文提供的算法,可以快速高效地获取大范围内的沟谷网络和分水线网络,从

而实现流域地形的自动分割。

3. 动态更新。基于 DEM 数据源的动态快速更新,本文提供了流域分割信息快速更新的技术。

6.2 研究发展方向

流域地形自动分割的最终目标是要获取最小水文地貌单元,这是建立流域空间分布式模型的基础。最小水文地貌单元的获取不仅对流域分布式水文模型,而且对建立流域分布式土壤侵蚀模型、流域生态模型等有着重要意义。在黄土地区提取最小水文地貌单元,必须结合沟沿线的提取,因为沟沿线是黄土地区地貌形态上的重要分界线,该线上线下的坡度、侵蚀强度、产流方式等都有很大的不同。

本文设计的流域地形自动分割技术,为遥感和 GIS、GIS 和空间分布式机理-过程模型提供了一个重要的接口。利用该技术构建的空间数据库可以成为利用 GIS 进行流域治理、流域规划的基础数据库,用于处理与地形或流域空间位置有关的各种地学问题。前面已谈到,通过建立一个与沟谷拓扑编码并行的属性文件,对汇流网络的操作可以扩展到相关的汇流区。这个属性文件可包含与子汇流区或沟谷段相关的任何信息,可以是来源于高程数据,也可以是匹配到特征地貌或 DEM 上的其它数据。因此,这样一个空间数据库具备两大优势,一是信息的可更新性,二是信息处理的便捷性。信息的可更新性主要依赖于 DEM 和其他遥感信息的周期性获取和特征地貌提取算法的适应性。信息处理的便捷性主要来源于 GIS 强大的空间分析功能。

因此,流域自动分割技术要走向实用化,还有一些相关问题有待进一步的解决。如特征地貌提取算法对各种地貌的适应性,DEM 的空间分辨率和数据精度对于特征地貌提取的影响,以及 DEM 分割与合成、流域分割信息与其他信息的配准等方面,都有很多工作要做。

参 考 文 献

- 1 Moore, I. D, O Loughlin, E. M., Burch, G. J. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. *Earth Surface Processes and Landforms.*, 1988, 13.
- 2 Bend L. E. Extraction of Cannel Networks and Topographic Parameters from Digital Elevation Data. *Channel Network Hydrology*, 1993.
- 3 钱亚东, 闫国年, 陈钟明. 基于数字高程模型自动生成水沙运移路径图. *泥沙研究*, 1997, 3: 24—31.

- 4 Shreve, R. L. Infinite topologically random channel networks. *Journal of Geology*, 1967, 75.
- 5 Krumbain, W. C, Shreve, R. L. Some Statistical properties of dendritic channel networks. 1970, Tech. Rep. 13, Research Task 389—150, Dept of Geol. Sci., Northwestern University.

作者简介

闫国年,男,1961年1月出生,教授。1990年毕业于中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室,获博士学位。现从事地理信息系统领域的研究工作,已出版专著5部,地图集1部,研究论文40多篇。

Study of Automated Topography Partition of Watersheds

Lu Guonian Qian Yadong Chen Zhongming

(*Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science, Nanjing Normal University Nanjing 210097*)

Abstract In this paper, the authors present a technique of watershed structure extraction and watershed partition automatically based on grid digital elevation model (DEM) data. This technique consists of three parts: definition of topographic structure; definition of watershed structure, and algorithm design which is used to extract the characteristics of topography from DEM data. The authors consider that the channel network and the divided network as the two basic frameworks of a watershed. The polygons constructed by the above networks are corresponding to the catchments which make up the watershed. The framework consisting of these catchments, the basic topographic units, and their topologic relationship can be used to store the watershed information and to construct spatial distributed mechanism-course models. The watershed of Wangjiagou in Lishi County of Shanxi Province, located in a gully area in loess plateau, was selected as a pilot study area, and the final results are in accordance with the real condition of the case study area.

Key words digital elevation model, topographic structure, Watershed structure, Algorithms