

流域拓扑关系建立方法研究^{*}

刘先龙¹, 杨勤科²

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 水文网络模型是地理信息系统对流域实际河网水系的一种规范化描述, 能够完整反映出流域水文地貌要素的拓扑关系。利用 DEM 提取流域河网信息, 在此基础上尝试建立能够完整反映流域水文地貌要素拓扑关系的矢量流域水文网络模型, 并以此探讨流域汇流关系的演算方法。并使用县南沟流域数据进行实验, 检验方法的有效性。

关键词: DEM; 水文网络模型; 拓扑关系; 流域汇流关系

中图分类号: P931; T P79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)03-0082-05

Study of Method of Building Topology for Watersheds

LIU Xian-long¹, YANG Qinko²

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shannxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: Hydro-network is the standardized representation of the watersheds' river network by the Geographical Information System, and it is able to completely describe the topological relationship of the components of hydro-network. The key to build a hydro-network model lies in defining the components of hydro-network and establishing the association among these components. In this paper, using DEM to extract the components of landform, and then to build a vector data hydro-network model, much attention was paid to the discussion of how to get the confluence relationship of the watersheds' river network based on this model. And this methods of building hydro-network model was applied to the Xiannangou watershed.

Key words: DEM; hydro-network; topology; confluence

径流和泥沙物质向沟道的汇集和通过沟道网络系统的运移过程, 是水文和侵蚀模拟的重要环节^[1], 而流域之间汇流关系(流域拓扑关系)的建立, 则是流域水文和侵蚀模型的基础^[2]。已有关于河流拓扑关系的建立主要有两种方法。一种是基于计算机图论的节点连接表描述各水源之间的逻辑联系, 通过建立流域概化图, 以深度优先遍历的递归理论为基础, 采用可视化编程技术, 实现流域拓扑的建立^[3]。此种方法能很好地建立流域拓扑关系, 但数据结构复杂, 程序维护困难, 不能很好地利用 Arc/Info 基于 DEM 的水文分析后生成的河流和流域属性表。

另外一种方法是利用 Arc/Info 基于 DEM 水文分析生成流域图和河网图后, 根据河流和流域的对应关系, 人工完成流域的拓扑关系建立^[4]。此种方法虽能建立流域的拓扑, 但对于流域的个数较多的情况, 工作量十分巨大, 耗时耗力。

利用 ESRI 开发的 Hydrology 水文工具, 基于 DEM 提取流域内的径流节点, 河网水系和流域边界的空间位置信息, 以获取流域水文地貌要素的矢量数据。在此基础上, 研究如何有效建立能够完整反映流域水文地貌要素拓扑关系的流域水文网络模型。最后以此探讨流域汇流关系的演算方法。同

^{*} 收稿日期: 2010-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(40971173); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB407203)

作者简介: 刘先龙(1983-), 男, 陕西咸阳人, 在读硕士, 主要研究方向为资源环境 GIS 应用。E-mail: lx13260219@163.com

通信作者: 杨勤科(1962-), 男, 陕西陇县人, 研究员, 博士, 主要从事区域水土流失和 GIS 应用研究。E-mail: qkyang@ms.isw.c.ac.cn

时,以县南沟流域进行实验,建立流域水文网络,并演算流域内的汇流关系。

1 DEM 流域水系特征提取

1.1 研究区域概况

研究区位于延河 2 级支流—县南沟流域,位于 $109^{\circ}11'15''-109^{\circ}22'30''\text{E}$, $36^{\circ}42'30''-36^{\circ}47'30''\text{N}$, 总面积约 44 km^2 , 海拔 $1\,012\sim1\,432\text{ m}$, 平均海拔 $1\,220\text{ m}$, 地势西高东低,属于典型的黄土丘陵沟壑地貌类型。其地形形态复杂,沟壑纵横,地面坡度陡峻,平均坡度达 28° ,是典型受人类活动影响的水土流失严重区。用以提取河网、流域等水文地貌要素的基础数据是陕北县南沟流域的分辨率为 10 m 的 DEM (图 1)。该 DEM 是基于 1:1 万数字地形图(包括等高线、高程点和河流),在 ANUDEM 软件平台下生成,具有较高精度和对地形的表现能力^[5-6]。

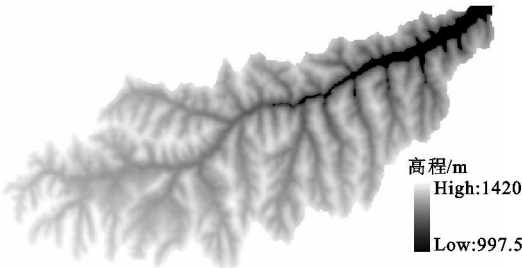


图 1 县南沟 DEM

1.2 水文地貌要素特征提取

本研究中河网和流域特征的提取,采用 O' Callaghan 和 Mark^[7] 提出的坡面流模拟方法。提取流程如图(2)。具体操作在 ArcGIS 9.2 中的 Hydrology 模块中完成。

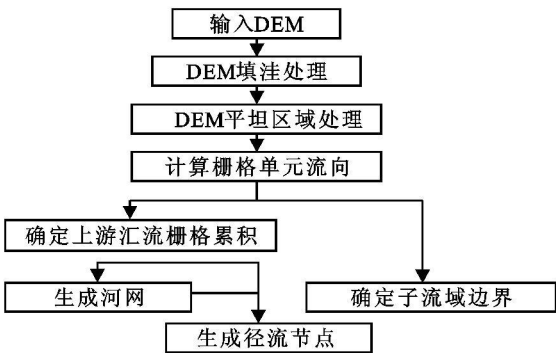


图 2 流域水文地貌要素提取流程图

集水面积阈值的选取对基于栅格 DEM 所提取的流域河网及其特征有很大影响^[8-9]。一般通过比较河源密度、河网密度与集水面积阈值的关系来确定合理的集水面积阈值。河源密度是指流域内汇流源头个数与流域面积之比。河网密度是指流域内河网长度与流域面积之比。这两个参数能够直接反映出相应集水区面积所提取的河网状况。

本文中对于县南沟流域所设定的集水面积阈值,以及根据其分别计算河源密度和河网密度见表(1),得出集水面积阈值与河源密度和河网密度关系见图(3)。

从图 3 中可以看出,随着集水面积阈值的变大,河源密度和河网密度开始有一个大的下降趋势,集水面积阈值为 0.75 km^2 时,这种趋势开始变得平缓;集水面积阈值由 0.35 km^2 增至 0.75 km^2 ,河源密度和河网密度分别减少了 $0.475\,1$ 和 $0.675\,4\text{ km/km}^2$;而集水面积阈值由 0.75 km^2 增至 3 km^2 时,河源密度和河网密度分别减少了 $0.226\,9$ 和 $0.381\,9\text{ km/km}^2$ 。

表 1 河源密度、河网密度与集水面积阈值关系

项 目	集水面积阈值/ km^2									
	0.35	0.4	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5	3
河源密度($1/\text{km}^2$)	0.8571	0.6927	0.4944	0.3820	0.3371	0.2921	0.2472	0.2016	0.1799	0.1651
河网密度/ $(\text{km}\cdot\text{km}^{-2})$	1.4912	1.1507	0.9902	0.8158	0.7351	0.6472	0.5656	0.5078	0.4656	0.4339

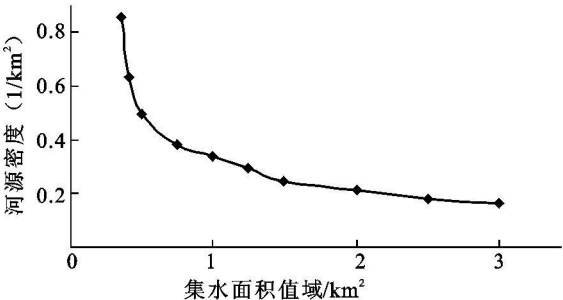
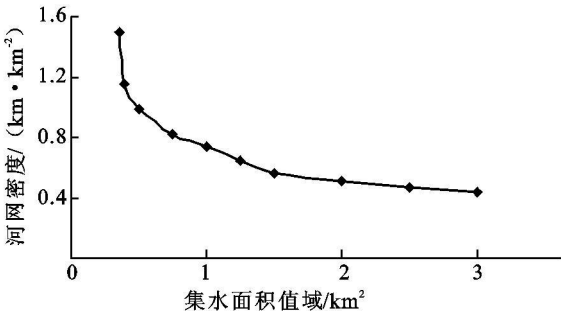


图 3 河源密度、河网密度与集水面积阈值关系

因此,本文认为在利用水平分辨率为 10 m 的栅格 DEM 提取县南沟流域的流域边界、河网时集水

面积阈值为 0.75 km^2 。由此所提取的河网和子流域如图(4),径流节点如图(5)。

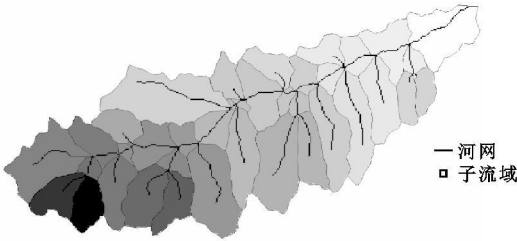


图 4 县南沟河网和子流域

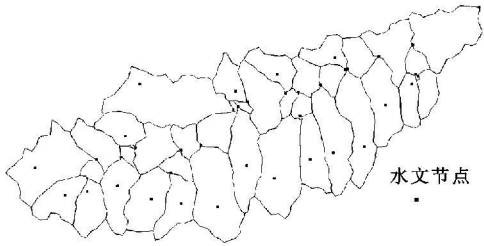


图 5 县南沟径流节点

2 流域水文网络模型

2.1 流域水文网络模型简介

流域水文网络(hydro-network)是指由流域上的水文边线和水文节点所组成的几何网络,是地理信息世界对流域实际的河网水系的一种规范化描述^[10]。在流域水文网络模型中,将流域内各种水文地貌要素抽象成几个基本空间形状类:水文结点(点);水文边线(线);水文区域(面)^[11]。在本文中,水文节点指河段的端点。它可分为三种情况:河流最上游的起源节点;流域最终的出口节点;河流的汇流节点。水文边线指两个水文结点之间的河段。水文区域指集水区域,即子流域。

拓扑关系是指点、线、面等几何形状之间的相接、相邻、相交关系。在流域水文网络模型中,水文地貌要素之间的拓扑关系主要考虑两大类:(1)构成水文网络的拓扑关系,它包括:水文节点与河段之间的对应关系,即河段端点对应的水文节点;子流域与河段的对应关系,即河段对应的集水区域;子流域与水文结点的对应关系,即各个子流域与其出口节点的对应关系。(2)反映流域汇流关系的拓扑关系,包括:水文节点之间的上下游关系;河段之间的上下游关系;子流域之间的汇流关系。

构成水文网络的拓扑关系主要反映不同类要素的相互关联,使流域水文网络模型能够完整描述流域水文实体。反映流域汇流关系的拓扑关系主要是由水流流向所确定的同类要素之间的上下游关系及其汇流关系。

2.2 流域水文网络模型的拓扑结构设计

在矢量水文地貌要素(径流节点、河段、子流域)文件中,属性字段不仅能用来描述要素的本身性质,如河段的长度,子流域面积等,而且可以利用属性字段来记录水文地貌要素之间的拓扑关系。通过属性字段的记录来实现水文节点,河段边线和子流域文件之间的相互关联,从而构成完整的流域水文网络。各类水文地貌要素文件中属性字段设计如下。

- (1) 水文节点文件: 标识码 Point-ID; 节点类型 P-flag。
- (2) 河段边线文件。标识码 Riv-ID; 汇入节点 From-node; 汇出节点 To-node; 汇入河段 Riv-in; 汇出河段 Riv-out; 对应子流域: Rbasin-id。
- (3) 子流域文件。标识码 Basin-ID; 对应河段 Briv-id。

水文地貌要素文件属性及关联结构见图(6)。

2.2.1 构成水文网络的拓扑关系描述 流域水文网络拓扑关系的构建是以河段边线文件为桥梁的。将它分别关联径流节点文件和子流域文件,以使水文节点和子流域文件间接地相关联。从而达到流域内不同类水文地貌要素之间的相互关联,构建出不同类要素之间完整的拓扑关系,如图(6)中实线连接所示。

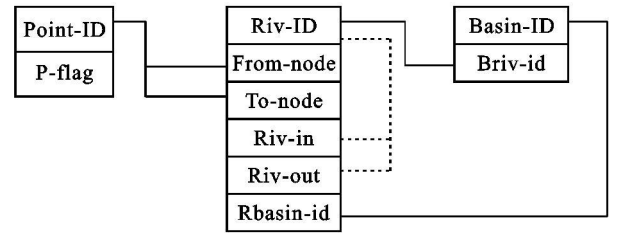


图 6 水文地貌要素属性关联结构示意图

具体的说,河段边线的起始点(From-node)和终止点(To-node)、属性记录的是河段端点,也就是水文节点的唯一标识码(Point-ID)。河段边线的对应子流域(Rbasin-id)属性记录河段所在子流域的唯一标识码(Basin-ID)。相应的,子流域的对应河段(Briv-id)属性记录其对应的河段标识码(Riv-ID)。径流节点与子流域通过对应的河段边线相关联。

2.2.2 反映流域汇流关系的拓扑关系描述 流域尺度上的水流流向决定了流域的汇流关系。流域汇流关系是使用属性字段,记录各文件内部的每个水文地貌要素实体的唯一标识码来实现的。

具体来说,河段边线的汇入河段(Riv-in)和流出河段(Riv-out)属性分别记录了该河段的上游河段和下游河段的唯一标识码(Riv-ID)。对于一条河

段, 汇入河段(Riv-in)有两种情况: 该河段为源头河段, 没有汇入河段, 属性记录为- 999; 该河段不是源头河段, 最少有 2 条汇入河段, 则分别记录该河段的上游河段的唯一标识码(Riv-ID)。汇出河段(Riv-out)也有两种情况: 该河段为流域最终汇出河段, 没有汇出河段, 属性记录为- 1 000; 该河段不是流域最终汇出河段, 则只能有 1 条汇出河段, 记录该河段的下游河段的唯一标识码(Riv-ID)。

如图(6)中虚线连接所示。径流节点, 子流域的上下游关系本身是由河段方向决定, 通过它们分别与河段边线的关联就可获得。

2.3 河流汇流关系的算法实现

河流汇流关系是通过对各条河段之间的起始点(From-node)和终止点(To-node)属性的判定来进行。判定方法为: 若河段 A 汇入河段 B 中, 则 A 的终点(To-node)必然是 B 的起点(From-node), 从而在 A 的 Riv-out 属性中记录河段 B 的唯一标识码(Riv-ID), 在 B 的 Riv-in 属性中记录河段 A 的唯一标识码(Riv-ID)。通过这一规则, 对每一条河段进行如上判断, 就可判断整个河网的汇流关系。

在 ArcGIS 支持下, 根据流域汇流关系的实现原理, 使用 VB 编程实现。河段汇流关系演算的 VB 代码如下:

```
/* 定义与河网文件属性对应的结构体
Structure HDSUJU
Dim From-node As UInteger
Dim To-node As UInteger
Dim Riv-ID As Integer
Dim Riv-out As Integer
Dim Riv-in As Integer
End Structure
/* 计算河段流出 Riv-out
For i = 0 To n
flag = 0
For j = 0 To n
If HDSJ(i).To-node = HDSJ(j).From-node
Then/* HDSJ 为河段数组
HDSJ(i).Riv-out = HDSJ(j).Riv-ID
flag = 1
Exit For
End If
Next
If flag = 0 Then
HDSJ(i).Riv-out = - 1000
End If
```

```
Next
/* 计算河段流出 Riv-in
For i = 0 To n
flag = 0
For j = 0 To n
If HDSJ(i).From-node = HDSJ(j).To-node
Then
HDSJ(i).Riv-in = HDSJ(j).Riv-ID
flag = 1
End If
Next
If flag = 0 Then
HDSJ(i).Riv-in = - 999
End If
Next
```

3 结果与分析

3.1 流域水文网络

利用县南沟流域 10 m 分辨率 DEM, 应用 Hydrology 水文工具提取的水文地貌要素(径流节点、河段边线和流域边界)信息, 存储为矢量数据, 并在此基础上建立县南沟流域水文网络, 如图(7)。在图中河段边线文件中用起始点(From-node)和终止点(To-node)属性记录水文结点的唯一标识码(Point-ID); 用对应子流域(Rbasin-id)属性记录河段所在子流域的唯一标识码(Basin-ID)。子流域边界文件中, 设定对应河段(Briv-id)属性记录其对应的河段标识码(Riv-ID), 构成了完整的水文网络。

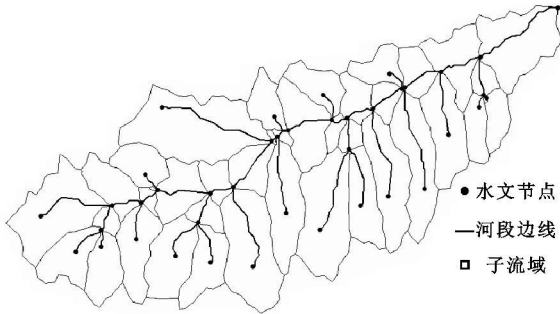


图 7 县南沟水文网络图

3.2 河流拓扑关系

演算出的县南沟流域河流汇流关系记录在河段边线文件属性表中(表 2)。所有源头河段的汇入河段(Riv-in)属性记录为- 999; 流域最终汇出河段的流出河段(Riv-out)属性记录为- 1 000; 其它河段中这两个属性分别记录着上游河段和下游河段的唯一标识码(Riv-ID)。

表 2 河段边线文件属性记录表

Riv-ID	F-node	T-node	Riv-in	Riv-out	Rbasin-id
1	2	1	2, 9	- 1000	3
2	3	2	4, 16	1	6
3	4	5	- 999	5	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
38	38	31	- 999	32	40
39	39	21	- 999	20	41

4 结 语

本文研究了基于 DEM 的流域拓扑关系的建立方法。通过 ArcGIS 9.2 中的 Hydrology 模块对县南沟流域的 DEM 进行分析处理,得到各类水文地貌要素数据,建立了使用属性记录径流节点、河段和流域边界对应关系的矢量水文网络。依据河流流向信息,设计算法,使用 VB 编程语言,实现了基于河段文件属性表的河流汇流关系的建立。从而方便了河流拓扑关系的维护和调用,也克服了人工建立拓扑关系的繁琐。ArcGIS 中,由于点与线栅格数据转换成矢量数据算法的不同,造成矢量数据中本应“重合”的径流节点与河段边线的端点存在栅格尺寸上的空间位置误差。解决这一问题,应考虑从矢量河段边线文件中直接提取河段端点信息,构造矢量水文节点文件。河流汇流关系是使用属性表记录河段的上、下游信息,只实现了河段在上、下游的有限延伸,不能实现河段在全流域的汇流关系表达。解决这一问题,可考虑结合河流分级编码规则,利用现有的汇流关系演算方法,对河段文件进行从流域最终流出河段逐级向上到汇水源头河段的汇流关系、河流等级和编

码记录,从而建立河段在全流域中的拓扑关系。

参考文献

[1] 杨勤科,李锐,徐涛,等.区域水土流失过程及其定量描述的初步研究[J].亚热带水土保持,2006,18(2):20-23.

[2] 熊立华,郭生练.分布式流域水文模型[M].北京:中国水利水电出版社,2004.

[3] 陈玉芬,李书琴,何东健.流域拓扑结构分析与计算机实现[J].干旱地区农业研究,2005,23(5):183-186.

[4] 任洪玉,杨韩琳,张晓萍.全国水文计算单元空间数据库的建立与应用[J].水土保持通报,2003,23(3):55-59.

[5] 杨勤科,McVicar T R,李领涛,等. ANUDEM: 专业化数字高程模型插值算法及其特点[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):36-41.

[6] 张彩霞,杨勤科,段建军.一种高质量的数字地形模型建立方法: ANUDEM 法[J].中国农学通报,2005,21(12):411-411.

[7] O' Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer vision, graphics, and image processing, 1984, 28(3): 323-344.

[8] 孔凡哲,李莉莉.利用 DEM 提取河网时集水面积阈值的确定[J].水电能源科学,2005,23(4):65-67.

[9] 熊立华,郭生练.基于 DEM 的数字河网生成方法的探讨[J].长江科学院院报,2003,20(4):14-17.

[10] 熊立华,郭生练,陈华,等.水文网络模型在分布式流域水文模拟中的应用[J].水文,2007,27(2):26-29.

[11] 熊立华,万民.基于数字高程模型的河道分级与节点编码[J].长江科学院院报,2007,24(1):23-26.

(上接第 81 页)

[3] 毕晓丽,覃德华,葛剑平. NDVI 起伏型时间序列模型初探[J].应用与环境生物学报,2004,10(4):339-401.

[4] 李奇峰,张海林,陈阜.东北农作区粮食作物种植格局变化的特征分析[J].中国农业大学学报,2008,13(3):74-79.

[5] 赵伟,李召良.利用 MODIS/ EVI 时间序列数据分析干旱对植被的影响[J].地理科学进展,2007,26(6):40-47.

[6] 彭代亮,黄敬峰,金辉民.基于 MODIS-NDVI 的浙江省耕地复种指数监测[J].中国农业科学,2006,39(7):1352-1357.

[7] 于信芳,庄大方.基于 MODIS NDVI 数据的东北森林物候期监测[J].资源科学,2006,28(4):111-117.

[8] 张霞,孙睿,张兵,等.基于 MODIS 植被指数时间谱的华北平原土地覆盖分类[J].农业工程学报,2006,22(12):128-132.

[9] 李月臣,陈晋,宫鹏,等.基于 NDVI 时间序列数据的土地覆盖变化检测指标设计[J].应用基础与工程科学学报,2005,13(3):161-273.

[10] 朱孝林,李强,沈妙根,等.基于多时相 NDVI 数据的复种指数提取方法研究[J].自然资源学报,2008,23(3):534-541.

[11] Chen J, Jonsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time series data set based on the Savitzky-Golay filter [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 6(91):332-344.