

利用 GIS 和 RS 技术分析青藏高原风火山 小流域地形地貌特征

李小兵, 张 钰, 何 冰, 段志华

(兰州大学 资源与环境学院, 甘肃 兰州 430000)

摘 要: 以 $30 \times 30\text{m}$ DEM 为基础, 在 GIS 技术辅助下, 以青藏高原风火山小流域为例, 设计了水文响应单元划分的实现方案和算法, 并结合不规则网格的有限体积法, 进行流域水文模拟方式的探讨。从 DEM 中提取子流域, 利用遥感图像进行土壤覆被类型划分, 使得生成的每个水文单元有单一的土壤覆被类型, 并根据所得类型图, 进行流域积水面积阈值的求取; 结合有限体积法不规则网格技术, 对流域网格划分进行讨论, 确定用于微分方程求解的编码方式。结果表明: 结合 RS 和 GIS 能较准确地划分流域土地利用类型, 求取河网集水面积阈值, 划分流域网格单元和存储结点数据, 实现了分布式流域建模的空间离散化, 用于冻土草地区模型数值模拟具有方便、可行性。

关键词: DEM; GIS; 水文效应单元; 遥感图像分类; 有限体积法; 不规则三角形网格

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)01-0159-05

Analysis of topographic feature of a small watershed in Fenghuoshan mountain basin with GIS and RS technology

LI Xiaobing, ZHANG Yu, HE Bing, DUAN Zhihua

(College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 430000, China)

Abstract: Based on the $30 \times 30\text{ m}$ DEM and GIS, taking an example of the Fenghuoshan Basin in Qinghai - Xizang Plateau, the paper discusses watershed hydrological modeling and designs the scenario and algorithm of the hydrological response unit (HRU) division with finite volume method of irregular grid. Sub-basins are generated from DEM data, and types of soil cover can be divided by remote sensing images. Every hydrological unit has a uniform type soil cover, threshold value of catchment area is calculated based on the chart to get the threshold of watershed area catchment area. Combined with the irregular grid of finite volume method, the paper discusses the watershed grid division, and then defines decoding method of the differential equation. The results show that combining RS with GIS can accurately divide the land use type of watershed and get the threshold of watershed catchment area. Spatial discretization of distributed hydrological model is realized by dividing watershed grid unit and storing grid data. It's practicable and workable to apply this method to numerical simulation of permafrost meadow area.

Key words: DEM; GIS; hydrological effect unit; remote sensing image classification; finite volume method; irregular triangle network

0 引 言

在具有物理基础的流域分布式水文模型中, 主要水文过程(坡面流、非饱和和饱和土壤水热运动、河网汇流)由相互耦合的高度非线性的偏微分方程组来描述, 如 Richard 方程、Boussinesq 方程和 Saint - Venant 方程组等^[1], 模型的参数具有明确的物理意义, 可通过试验和观测得到。有限体积法是当前

流动和传热问题数值求解中最成功的方法, 它对离散的控制体积进行积分, 保持特征变量在控制体积内的守恒特性, 同时各离散项都有明确的物理意义, 得出一组离散方程^[2], 耦合求解该方程组, 及得到特征变量。流域水文模拟的结果很大程度上依赖于输入的数据, 只有获得详细的地形、地质、土壤、植被和气候资料, 对大范围的流域气候变化和土地利用产生的水文影响研究才有可能。然而, 在水循环方

收稿日期: 2012-10-12; 修回日期: 2012-10-25

基金项目: 冻土国家重点实验室开放基金项目 (SKLFSE201109)

作者简介: 李小兵 (1985-), 男, 湖北天门人, 硕士研究生, 研究方向为生态与陆面水文过程。

面,遥感作为一种信息源,可以提供土壤、植被、地质、地貌、土地利用和水系水体等许多下垫面条件的信息,也可以获得降雨的空间分布特征、估算区域蒸发、监测土壤水分等^[3],这些信息是确定产汇流特性和模型参数所必需的,特别是对一些缺少或者无资料地区,显得更为重要。准确地描述流域地形,对流域进行子流域、植被覆被类型和水文响应单元划分是流域分布式水文模拟的第一步,也是减小水文模拟误差的重要步骤。不规则三角网格能够高效地描述流域地形,适用性强,灵活,特别适用于边界比较复杂的问题^[1],而水文模型中流域、子流域通常是极不规则的。因而,如何准确地划分流域水文单元,结合有限体积法进行模型数值求解是水文模拟中非常重要的一步。

遥感数据具有多时相的特点,ENVI 作为一种遥感图像处理软件,所处理的结果能够为 GIS 数据库的更新提供重要的信息^[4]。通过 ENVI 与 GIS 的相互转换,遥感数据可以 3 种数据形式转入 GIS;遥感影像、分类遥感影像(创建栅格图像)、将分类遥感图像转换为矢量图层,从而可以为 GIS 系统动态连续的提供资源、环境等区域空间信息,增强了系统进行动态分析、趋势分析与区域发展辅助决策的能力;另一方面,GIS 所提供的辅助信息,通过 ENVI 与 GIS 的接口,转入 ENVI,叠加到影像图上,可提高 ENVI 对遥感图像的判别分类与应用。GIS 用于水文单元划分的研究已经较多,张旭、蒋卫国等以洞庭湖为例描述了基于 DEM 的水文响应单元划分方法,并提出确定计税面积阈值的适度指数法^[5];许捍卫等以秦淮河为例,提出了一种利用遥感影像提取流域水系信息,采用基于数字河流和湖泊网络(DRLN)的水流方向修正法修正 DEM 中平坦地区主干河流及湖泊地区栅格的水流方向的流域数字水系提取方法^[6];熊立华、郭生练等提出水文网络模型表达水文网络的构成要素,建立要素间的拓扑关系^[7]。RS 在水文模拟中的应用有分类信息提取^[8-9]、参数反演^[10]、蒸发量估算^[11]和土壤水分信息提取^[11]等。比较常用的遥感处理软件有 ERDAS、PCI、ENVI 和 ECOGNITION,常用的遥感图像分类方法有监督分类、非监督分类和基于专家知识的决策树分类。

本文基于青藏高原风火山多年冻土区典型小流域的 DEM,运用 GIS 和 RS 技术,同时结合有限体积法不规则三角网格技术,探讨冻土区小流域地形描述和水文单元划分的方法,为青藏高原多年冻土区的水文模拟过程奠定基础。

1 研究区概况

研究区位于长江源区北麓河一级支流——风火山小流域。地理坐标为 $34^{\circ}43.2'N, 92^{\circ}53.9'E$,海拔 $4\,510 \sim 4\,723\text{ m}$ (图 1)。

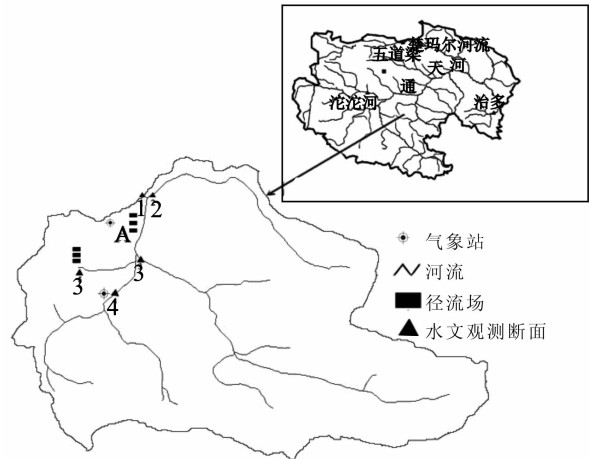


图 1 研究区地理位置图

研究区为典型的多年冻土区流域,流域内少有积雪和冰川覆盖。该区气候寒冷干燥,降水年内分配极不均匀,5-10 月集中全年 90% 以上的降水;年均蒸发量为 $1\,316.9\text{ mm}$,相对湿度 57%;年均太阳短波辐射 186 W/m^2 ,平均风速为 4.2 m/s ;年平均地温在 $-1.5 \sim -4.0^{\circ}\text{C}$ 间波动,永久冻土厚度为 $50 \sim 120\text{ m}$,活动层厚度为 $0.8 \sim 2.5\text{ m}$ 。流域内土壤成土母质以第四纪沉积物为主,同时包含变质岩、中性侵入岩等岩石风化的坡、残积物,砂砾石、碎石土及亚粘土夹碎石。研究区内植被覆盖状况较好,从山顶到沟谷依次为高山荒漠、高山草原、高寒草甸和高寒沼泽草甸。草甸物种较为单一,青藏野草、早熟禾、矮嵩草、藏嵩草等物种较为常见。植被平均高度不足 20 cm ,根系深度可达 100 cm ,且集中分布于 $0 \sim 30\text{ cm}$ 。植物从每年的 5 月初开始生长,到 10 月中旬生长停止,期间经过生长前期、生长期、生长后期和冻结期。研究区多年冻土大片分布,厚层地下冰发育,多年冻土类型以富冰、饱冰冻土和含土冰层为主。天然地面多年冻土上限 $1.3 \sim 2.5\text{ m}$,在河沟岸和滩地上限较深,可达 4.0 m 以上。

2 流域地形描述方法

流域的土地利用类型可以根据土地利用类型图获得,也可由遥感图像进行分类处理获得。

遥感影像分类是将影像中的每个象元根据其在

不同波段的光谱特征、空间结构或其他信息,按照每种规则或算法划分为不同类别的过程。用于确定下垫面不同的土地覆被类型,便于对各单元进行分别分析计算。

DEM (Digital Elevation Model , 数字高程模型) 数据中包含了丰富的地形、地貌、水文信息,能够反映各种分辨率的地形特征,通过 DEM 可以提取大量的地表形态信息,如流域网格单元的坡向、坡度以及单元格之间的关系等。从 DEM 直接提取河网水系及相关流域信息,是分布式水文模型开发与应用的基础。目前,基于 DEM 的流域离散化方法主要有网格 (grid)、山坡 (hill slope)、子流域 (sub-basin)、水文响应单元 (Hydrological Response Unit, HRU)、典型单元面积 (Representative Elemental Area, REA)、分组响应单元 (Grouped Response Unit, GRU) 及其组合等。其中,HRU 划分方法能充分反映流域空间的异质性和相似性。流域水文响应单元 (HRU) 是指下垫面特征相对单一和均匀的区域,这个区域中的网格具有相似的水文特性。传统的水文模型以子流域为产流单元,而子流域中通常具有多种土地利用类型和土壤类型,其相互组合又会产生更加复杂的下垫面情况。为了进一步揭示流域内部的这种组合差异,需对每个子流域再进行 HRU 划分,使得每个 HRU 中仅存在单一的土地利用类型和土壤类型,充分体现流域下垫面的空间不均匀性。

2.1 遥感图像处理

遥感早期的研究主要是利用遥感资料获取流域地物信息、估算水文模型参数等,后期主要集中在运用遥感资料获取流域水文模型的输入和率定有关的参数。遥感技术可以提供从生态系统到生物群落有关群落结构和个体冠层的信息,高分辨率遥感影像甚至能对植物个体分类识别,高光谱遥感不但能够对植物优势种群,而且可以精确获取生态系统中各种复杂地物属性参量,满足各种模型输入参数的多类型与高精度需求。遥感技术还可提取多种水文要素参量(蒸发量、降水量、土壤水分等),有助于定量表达区域水文过程及其时空变化规律。遥感技术还可测量不同地貌和植被覆盖的土壤湿度条件,进行植被分类、生物量估算、水体识别等。非监督分类凭借遥感图像地物的光谱特征的分布规律,随其自然地进行分类,其类属是通过事后对各类的光谱响应曲线进行分析,以及结合实地调查相比较后确定的。对 30 × 30 m DEM 数据通过 GIS 工具拼接、流域划分和裁剪等功能,找出风火山小流域所在区 DEM

图,转化为矢量图后导入 ENVI 软件,对大面积遥感图像进行裁剪,得到粗略的风火山小流域遥感图;运用 K - Means 分类法,进行遥感图像分类,得到流域覆被分类结果,并通过分类结果叠加、混淆矩阵,ROC 曲线和实际观测,对分类结果进行评价和改进 (图 2)。本文运用前人的研究成果,结合 ENVI4.8、GIS10.0 和实际观察结果,选取风火山小流域 2008 年 8 月 10 日美国陆地卫星 Landsat - 5de TM 高质量遥感图像数据,共 7 个波段,运用非监督分类方法 K - Means 对其进行土地类型的划分。

2.2 水文离散单元划分

目前,GIS 与流域模型的结合主要表现为两种方式,即 GIS 软件中嵌入流域水文分析模块、流域模型软件中嵌入部分 GIS 工具的形式。

运用 ARCGIS 软件,由栅格型 DEM 自动生成河网、子流域分水线,并对河网与子流域进行编码,构建河网结构拓扑关系。

子流域生成的过程可概括为:填充 DEM 洼地;确定水流方向;生成水流累积矩阵;提取流域网络;流域分割和生成子流域。

(1)DEM 的数据主要来源于地形图、摄影测量与卫星遥感数据、地面测量,以及已有空间数据的计算和转换。由此使得 DEM 表面存在着一些凹陷洼地或者凸起高地。这些区域在进行水流模拟时,由于低高程栅格或高高程栅格的存在,从而使得进行水流流向计算时该区域得不到合理的甚至错误的水流方向。因此在计算前先对原始 DEM 数据进行填洼或削峰。填洼或削峰处理对每一个各网点进行搜索,找出凹陷点或凸起点并使其高程值等于周围点的最小或最大高程值。同时也生成一个由凹陷点或凸起点位置和填充深度或削掉高度的掩膜 DEM。

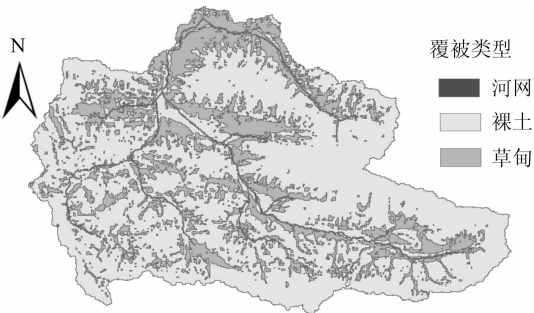


图 2 小流域覆被类型分类图

(2)判断单个网格流向的方法总的来说有两类:单流向法和多流向法。单流向法假定一个网格的水流只从一个方向流出网格,然后根据该网格与

周围网格(3×3 网格)的高程判断水流方向,包括 D8 法、Rho8 法、Lea 法、DEMON 法、D ∞ 法等。多流向法考虑水流按一定的比例分散的分配给高程较低的相邻网格,有 4 种类型:①固定水流分配权重;②水流分配权重随汇流面积变化;③水流分配权重随局域地形特征变化;④基于局域形态单元。

第 3 种方法优于其他 3 类,水流分配策略应在空间上随着与下坡坡度相关的地形参数而变。

从点 I 流向其相邻的 8 个点的任一较低的水量占总出流量的比重为:

$$f_k = \frac{S_k^p}{\sum S_k^p} \quad S_k > 0 \quad (1)$$

式中: f_k 为流量分配系数, S_k 为坡度; p 为与局域地形特征有关的参数。

(3) 汇流累积量是基于水流方向数据计算而来的。对每一个栅格,其汇流累积量的大小代表其上游有多少个栅格的水流方向最终汇流经过该栅格,汇流累积的数值越大,该区域越易形成地表径流。

(4) 首先需要确定最小水道上游集水面积阈值。上游集水面积大于该阈值的各网点定义为水道的起始点。流域内集水区面积超过该阈值的格网点即定义为水道。

生成的流域河网要尽可能和实际河网相符,因为河网生成的详细程度决定了生成的离散子流域数目,因此需要准确地确定集水面积阈值。

集水面积阈值的界定采用和遥感图像分类结果比较、结合实际情况的方法来确定。先设定一个初始阈值,将生成的河网与遥感图像分类结果和实际河网情况进行对比,不相符则改变阈值,直到生成的河网与遥感图像分类结果和实际情况尽可能吻合。

本文结合风火山小流域实际河流分布情况,选取 800、1200、1600、2000、2400、2800 等阈值反复试验,最终确定集水面积阈值 2800,提取出流域河网(图 3)。

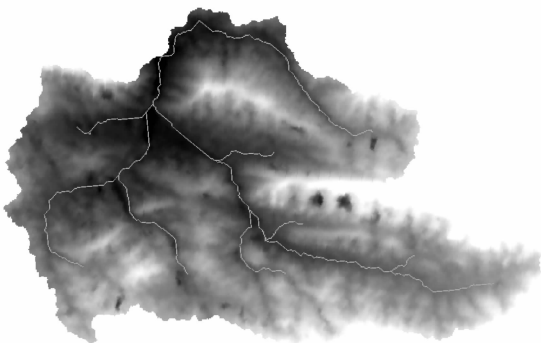


图 3 提取出的河网图

(5) 河网连接时记录着河网中的一些节点之间的连接信息,主要记录着河网的结构信息。因此通过河网连接的计算,即得到每一个河网弧段的起始点和终止点。同样,也可以得到该汇水区域的出水点。这些出水点对于水量、水土流失等研究具有重要意义,也为进一步的流域分割准备了数据。

(6) 河网分级是利用地表径流的思想,不同的级别的河网首先是其所代表的汇流累积量也不同,级别越高的河网,其汇流累积量也越大,这些往往是主流,级别较低的则是支流。河网分级也可以研究水流的运动、汇流模式,用于水土保持。河网分级流行的有 Strahler 和 Shreve 两种方法,本文采用 Shreve 结合水流方向栅格数据对河网栅格数据进行了分级。

(7) 河网节点记录着每一个河段的起始点和终止点的信息,由此可以得到该汇水区域的出水口。再根据河道中栅格汇流累积量的大小,结合栅格流向,确定流进河道栅格范围和流进河道栅格的上游栅格情况,由此得到一个子流域,进行编号。依次对个河段进行上述处理,最终得到整个小流域的子流域划分(图 4)。



图 4 划分的子流域图

将划分出来的流域与原始流域图进行对比,如果存在不相符的部分,去掉原始流域图中的多余部分,再进行子流域划分。流域边界的确定是一个反复、复杂的过程,需要不断对比,最终确定合理的流域范围。

将最终确定的子流域划分图与流域土地覆被类型图叠加。子流域中通常具有多种土地利用类型和土壤类型,其相互组合又会产生更加复杂的下垫面情况。为了进一步揭示流域内部的这种组合差异和满足有限体积法不规则离散格式要求,需对每个子流域再进行 HRU 划分,使得每个 HRU 中仅存在单一的土地利用类型和土壤类型,充分体现流域下垫面的空间不均匀性。

所得的流域地形以栅格形式进行描述,需要将

其转换为不规则三角形网格形式,对三角形网格中心点和节点属性进行合理高效存储(图5)。

TIN 是一个具有多空间尺度且边界形状简单的计算网络系统,其精度优于栅格单元,而复杂度小于其它不规则网格单元,是一个高效而简单的计算网格形式,能够高效率地描述地形,而且广泛应用于偏微分方程的有限单元法和有限体积法求解中(图6)。

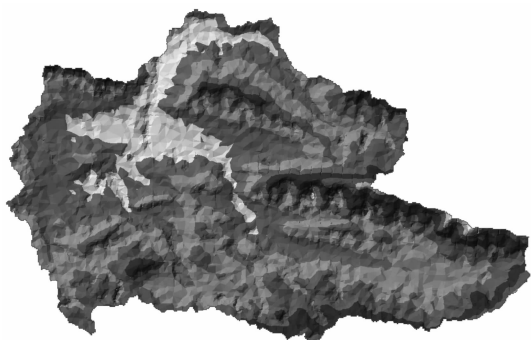


图5 风火山小流域 TIN 图



图6 不规则三角形网格和结点图

3 结 语

DEM 在水文信息提取中的应用主要是描述流域地形,包括流域划分和子流域边界的确定、河网的识别和提取等等。RS 可以用于区分流域的土地覆被类型。本文应用 GIS 和 RS 相结合的方法,合理选取河网集水面阈值,准确地描述流域土地利用

类型,构建流域不规则三角网格形式,便于进行水文偏微分方程的有限体积法求解。

考虑在遥感图像分类中,影像上表现出来的位置关系以及不同地类的纹理特征也是除光谱信息之外重要的可利用信息,进一步研究会将地类间位置关系及纹理特征考虑到遥感分类当中,对区域做进一步的细化分类,提高分类精度。

GIS 和 RS 的有效结合有利于准确描述流域地形,对提高水文模拟精度具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王 蕾. 基于不规则三角网格的物理性流域水文模型研究[D]. 北京:清华大学,2006.
- [2] 王 蕾,田富强,胡和平. 基于不规则三角形网格和有限体积法的物理性流域水文模型[J]. 水科学进展,2010, 21(6):733-740.
- [3] 赵寒冰. 流域地理过程分布式物理模型体系的集成与应用研究[D]. 南京:南京师范大学,2004.
- [4] 徐冬青,唐新军,贺 铮. 遥感图像处理软件 ENVI 与 GIS 软件的信息转换[J]. 水资源与水工程学报,2005, 16(1):67-70.
- [5] 张 旭,蒋卫国,周延刚,等. GIS 支持下的基于 DEM 的水文响应单元划分——以洞庭湖为例[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(4):17-21.
- [6] 许捍卫,何 江,余远见. 基于 DEM 与遥感信息的秦淮河流域数字水系提取方法[J]. 河海大学学报,2008, 36(4):443-447.
- [7] 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.
- [8] 任广播. 基于半监督学习的遥感影像分类技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.
- [9] 温兴平. 基于多分类器组合的高光谱遥感数据分类技术研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2008.
- [10] 张 杰. 半干旱区陆面过程参数化及其遥感反演研究[D]. 兰州:兰州大学,2009.
- [11] 胡光成. 银川平原地表蒸发量的估算及其在生态水文地质中的应用[D]. 北京:中国地质大学(北京),2010.