

基于 GIS 的泥石流流域分布式水文计算系统

杨 宇¹, 管 群¹, 胡凯衡^{2,3}, 李洪雷¹

(1. 四川大学计算机学院, 成都 610065; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;
3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘 要: 基于 GIS 技术与分布式水文模型, 设计并实现泥石流流域分布式水文计算系统。以流域降雨、高程、坡度等数据为输入, 对泥石流流域的降雨产流、产沙进行模拟, 自动批量计算指定时间段内每日流域出口清水流量、泥沙流量以及流水含沙量。将系统应用到云南蒋家沟泥石流流域中, 计算得到的高含沙水流含沙量与实测的含沙量数据误差很小, 表明系统具有较高的精度和适用性。

关键词: 地理信息系统; 空间数据; 泥石流; 分布式水文模型

GIS-based Distributed Hydrological Computational System of Debris-flow Watershed

YANG Yu¹, GUAN Qun¹, HU Kai-heng^{2,3}, LI Hong-lei¹

(1. College of Computer, Sichuan University, Chengdu 610065;
2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041;
3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041)

【Abstract】 Based on Geographic Information System(GIS) technology and distributed hydrological model, a computational system of debris-flow watershed is designed and implemented. With data such as rainfall, elevation and slope introduced, the system simulates rainfall-runoff and rainfall-sediment of the watershed to calculate runoff, sediment yield and sediment concentration automatically for each day. The system is applied to Jiangjia Valley, a debris-flow basin of Yunnan Province. Calculated result agrees well with the measured sediment concentration, which shows that the system has high reliability and applicability.

【Key words】 Geographic Information System(GIS); spatial data; debris-flow; distributed hydrological model

1 概述

泥石流是广泛分布于我国山区的一种地质灾害, 这种灾害暴发突然、来势凶猛, 对山区生态环境、水利水电、城镇厂矿、道路交通、农田水域、景观资源等造成严重危害, 已成为影响我国山区公共安全和工程安全的重大灾害之一。防治和减轻泥石流危害的方法和手段主要有泥石流的防治工程和生态措施、泥石流预测预报、泥石流危险性评价和泥石流风险管理等。而如何准确计算泥石流流量、临界激发雨量等水文特征参数是泥石流防治工程设计、泥石流预测预报、泥石流危险范围预测和泥石流保险对策等工作中的要点和难点。对泥石流灾害的预测和分析需要运用到大量的空间数据和空间数据处理技术, 传统的计算机信息处理技术在这方面存在很大的缺陷。地理信息系统(Geographic Information System, GIS)是一个功能强大的空间数据管理与分析的工具和平台。它以地理空间数据为基础, 在计算机软硬件的支持下, 对空间相关数据进行采集、管理、操作、分析和显示。GIS 技术的引进大大弥补了传统的计算机信息处理技术在空间数据处理上的缺陷^[1]。在这种背景下, 利用 GIS 技术对分布式水文模型进行集成, 构建分布式泥石流水文计算系统, 具有技术的可行性和实际的应用价值。

2 分布式泥石流流域水文计算模型

分布式泥石流流域水文计算模型采用美国水土保持局研制的 SCS 模型^[2], 进行空间分布的产流计算, 得到流域各网

格单元的净雨强度分布; 采用 MUSLE 方程进行产沙计算^[3], 得到流域各网格单元的产沙量。分别计算沟谷和山坡流速, 跟踪从流域出口顺着流向到每个上游单元的汇流路径, 用汇流路径除以流速计算整个汇流路径的汇流时间之和, 得到各个网格单元到达流域出口的总的汇流时间^[4]。将各个汇流时间段内到达出口的所有单元的体积流和产沙量分别求和, 得到出口的清水流量和泥沙量, 进而得到含沙量。

2.1 产流计算

SCS 模型是美国水土保持局研制的小流域暴雨径流估算模型, 其降雨-径流关系的最终表达式为

$$\begin{cases} R = (P - 0.2 \times MS)^2 / (P + 0.8 \times MS) & P \geq 0.2 \times MS \\ R = 0 & P < 0.2 \times MS \end{cases}$$

其中, P 为一次降雨的降雨总量(单位为 mm); R 为净雨深(单位为 mm); MS 为流域最大蓄水量(单位为 mm), $MS = 25400 / CN - 254$, CN (Curve Number)是一个无因次的、反映降雨前流

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40671025); 中科院知识创新工程重要方向基金资助项目(KZCX2-YW-302); 中科院成都山地灾害与环境研究所创新工程基金资助项目(1100001062)

作者简介: 杨 宇(1985—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 地理信息系统; 管 群(通信作者), 副教授、博士; 胡凯衡, 副研究员、博士; 李洪雷, 硕士研究生

收稿日期: 2009-10-21 **E-mail:** guanqun@cs.scu.edu.cn

域特征的综合参数,它与流域前期土壤湿润状况、坡度、植被、土壤类型和土地利用方式有关。

2.2 分布式汇流计算

为了得到每个格网单元上的降雨达到出口的时间,需要知道降雨在每个格网上的速度。速度的计算分沟谷单元和坡面单元进行。

2.2.1 沟谷流速

用曼宁方程和连续方程计算沟谷流速:

$$V_c = (SL^{0.3} \times Q^{0.4}) / (n^{0.6} \times B^{0.4})$$

其中, SL 是坡度; Q 是汇流量(单位为 m^3/s); n 是曼宁糙率系数; B 是河道宽度(单位为 m)。

$$Q = i \times A$$

其中, i 为净雨强度; A 为单元栅格面积; $i = R/t$, R 是净雨量(单位为 mm), t 是时间步长(单位为 s)。

2.2.2 坡面流速

用近似运动波动力方程和连续方程来估算坡面流速:

$$t_0 = (L^{0.6} \times n^{0.6}) / (i^{0.4} \times SL^{0.3})$$

其中, t_0 是每个栅格单元的流经时间; L 是地面流长度(单位为 m); n 是曼宁糙率系数; i 是净雨强度; SL 是坡度。得到 t_0 后用地面流长度 L 除以 t_0 便是每个单元格的流速。

2.2.3 汇流时间和清水流量

将沟谷单元的流速数字高程模型(DEM)和山坡单元的流速 DEM 进行合并得到整个流域的流速 DEM。其中因某天降雨为 0 或产流为 0 导致流速为 0 的栅格单元流速的值取其相同类型单元的平均值。然后计算每一个栅格单元到流域出口的流长,计算时用流速 DEM 的倒数作为权重,得到汇流时间 DEM,该 DEM 每个单元格的值是该单元格的净雨量到流域出口的汇流时间(单位为 s)。根据需要对汇流时间 DEM 分段,然后进行分区统计,求相同汇流时间段内到达流域出口的净雨量之和,得到流域出口的等流时流量过程。

2.3 泥沙流量和含沙量的计算

采用修正的通用土壤流失方程(MUSLE)来计算每一个栅格单元的产沙量:

$$S = 5.63 \times (R \times q \times A)^{0.56} \times K \times SL$$

其中, S 为产沙量(单位为 kg); R 为净雨深(单位 mm); q 为时段内洪峰流量(单位为 m^3/s),以体积流强度 $i \times A$ 代替, A 为单元栅格面积(单位为 m^2); K 为土壤可蚀性因子; SL 为坡度。公式中的系数由实测数据率定得出。

得到每个栅格单元的产沙量之后,结合汇流时间 DEM,统计求出各个汇流时间段内到达流域出口的泥沙流量,除以相应时间段内的总径流量(清水流量加泥沙流量),得到流域出口各时间段的含沙量。

3 系统结构设计

系统主要对分布式泥石流流域水文计算模型进行集成,还可以对每日流域降雨的文本数据进行处理,插值成为可以被 GIS 系统处理的栅格数据。此外,系统内还嵌入了一些常用的 GIS 功能。

3.1 技术集成

考虑到地理空间信息的广阔性和复杂性,以及泥石流灾害的突发性和动态性,系统采用组件式 GIS(ComGIS)开发方式。ComGIS 采用面向对象技术和组件技术,是基于微软 COM/ActiveX 规范实现的一种 GIS 系统,它将 GIS 的各大功能模块分化为独立的组件,每个组件完成不同的功能。各个 GIS 组件之间,以及非 GIS 组件与 GIS 组件之间,可方便地

通过可视化软件开发工具集成起来,最终形成 GIS 运用。GIS 功能的组件化为开发者带来了传统 GIS 运用无法比拟的优点,如小巧灵活、具有完备的 GIS 功能和直接嵌入的便捷性等,这也是组件式 GIS 开发成为目前 GIS 二次开发主流方式的主要原因^[5]。

基于 ComGIS,利用 ESRI 公司提供的 ArcGIS Engine 开发组件,结合 Visual C++ 进行二次开发。ArcGIS Engine 是一个创建定制的 GIS 桌面应用程序的开发产品,包括构建 ArcGIS 产品的所有核心组件。使用 ArcGIS Engine 可以在面向对象的编程环境中获取任意的 GIS 功能组合来构建专门的 GIS 应用方案,创建独立界面版本(stand-alone)的应用程序,或对现有的应用程序进行扩展^[5]。基于 ArcGIS Engine 进行开发的程序员可以使用遵循 COM 工业标准的任何语言,而在众多的语言中,出于对效率、安全以及系统的封装特性考虑,选用 C++ 语言。C++ 在 ArcGIS 开发中已经具备了比较完善的解决方案,不仅能实现对象的高度封装和抽象,与硬件结合速度快,而且有丰富的类库可供开发人员使用,在代码复用上具有很大优势,利于系统的扩展。此外,Visual C++ 开发环境提供了与底层的 Windows APIs 和 COM APIs 更低级别的交互,使程序开发更为灵活^[6]。

3.2 系统体系结构

系统体系结构如图 1 所示,可以划分为数据输入、数据计算和数据输出 3 个部分,3 个部分之间通过用户界面进行交互。

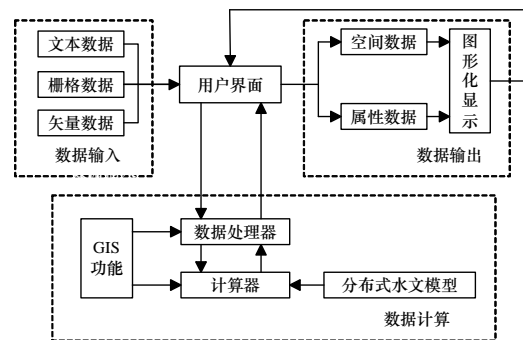


图 1 系统体系结构

在数据输入部分,用户主要可以通过图形用户界面输入:(1)文本数据,如通过雨量观测站点得到的雨量数据;(2)栅格数据,如流域高程 DEM;(3)矢量数据,如流域边界多边形。数据计算部分主要包括数据处理器和计算器,其中数据处理器对常用的 GIS 数据处理功能进行了集成和扩展,可以根据需要进行如文本数据结合矢量插值成栅格、栅格和矢量数据间的相互转换、投影坐标变换等操作;计算器是系统的核心部分,主要基于 GIS 对分布式泥石流流域水文计算模型进行拟合,对泥石流流域的清水流量、泥沙流量以及流水含沙量进行计算。此外,还可以进行一般 GIS 计算,如流域坡向、曲率等。数据输出部分主要负责将得到的空间数据和属性数据进行保存,并在用户界面上以图形的形式显示。

3.3 系统计算流程

系统的水文计算流程如图 2 所示。从指定的雨量栅格数据存放目录中取得最早一天的雨量栅格,若数据为空,直接结束计算;否则,用该雨量栅格和用户输入的数据进行产流计算,得到净雨深。接下来分为 2 步:(1)用净雨深,结合用户输入的坡度、高程、河道、糙率系数进行汇流计算,得到汇流时间;(2)用净雨深,结合用户输入的土壤可蚀性因子、

坡度进行产沙计算。完成后分别以净雨深和产沙量结合汇流时间,统计求出当日降雨贡献以及后续每日的流域出口清水流量和泥沙流量,并保存结果。获取下一天的雨量栅格数据,成功则继续按照上述步骤进行计算处理。当所有数据处理完毕时,获取下一天的雨量栅格数据将返回空值。此时,累加每一日清水流量和泥沙流量,得到每日清水总流量和泥沙总流量(某日的径流量不仅包括当天的降雨贡献,而且也包括了前一时期的降雨的贡献。因此,要叠加对当日径流量有贡献的前一时期的所有汇流量,得到当日总径流量)。最后按照“含沙量=泥沙流量/(泥沙流量+清水流量)”计算出每日流域出口清水含沙量。

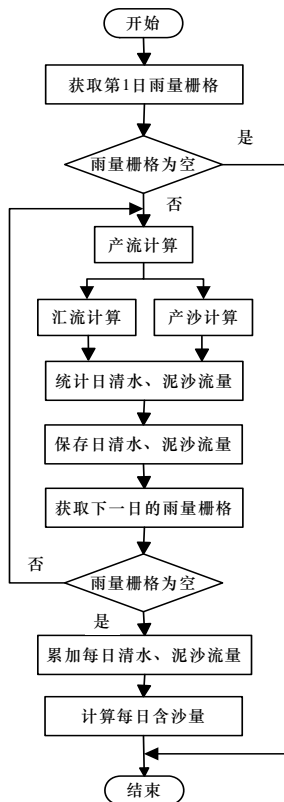


图2 水文计算流程

4 系统实现

4.1 系统功能

所实现的系统除了泥石流流域分布式水文计算功能之外,还对一些常用 GIS 功能进行了集成。系统功能框架如图3所示。

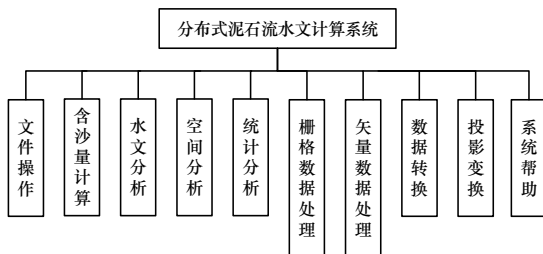


图3 系统功能框架

具体分析如下:

- (1)文件操作: 打开地图(.mxd)数据,加载栅格或矢量数据,保存、导出数据。
- (2)含沙量计算: 如上文所述,系统核心部分。
- (3)水文分析: 包含洼地填充、流向计算、流长计算、汇

流累积量计算、栅格河流到矢量、捕捉出水点、提取盆地、提取洼地、提取流域、河流分级、河流连接。

(4)空间分析: 包含坡度计算、破相计算、提取等高线、曲率计算、裁剪和填充、阴影计算、创建栅格、条件计算、地图代数。

(5)统计分析: 包含栅格统计、领域统计、区域统计。

(6)栅格数据处理: 包含翻转、镜像、旋转、扭曲、移动、拼接。

(7)矢量数据处理: 包含剪切、选择、切分、擦除、相交、联合、对称差、拼接。

(8)数据转换: 栅格和矢量数据间的相互转换。

(9)投影变换: 投影定义和变换投影。

(10)系统帮助: 系统说明文档。

系统主界面如图4所示,主要包括菜单、工具栏、内容表、地图浏览器、状态栏5个部分。

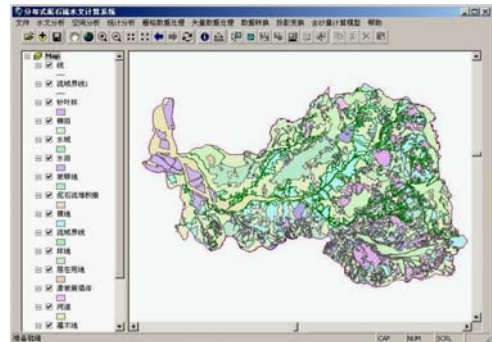


图4 系统主界面

4.2 计算实例

4.2.1 研究区概况

蒋家沟位于云南省昆明市东川区铜都镇境内,面积48.6 km²,主沟长13.9 km,是金沙江支流小江上的一条高频暴雨型泥石流沟,平均每年暴发十多次泥石流,最高年份达到28次,是世界最佳的泥石流观测、实验和研究场所。为了研究泥石流的形成起动、预测预报以及泥石流流域的产流产沙等,中国科学院东川泥石流观测研究站在整个蒋家沟流域布置了李家丫口、蚂蚁坪、银洞、陈家梁子、弯房子、阴家凹、背阴山、上凹子和观测站9个自动雨量观测仪,记录每天的雨量变化。在观测站附近的主沟道,也设立了观测断面,定时采集水样,记录清水流量和含沙量的变化。

4.2.2 数据计算和结果分析

基于上述9个雨量站点的雨量数据,对2008年7月23日-2008年8月19日的数场降雨进行模拟计算,将计算得到的含沙量与蒋家沟实测的含沙量进行对比,如图5所示。

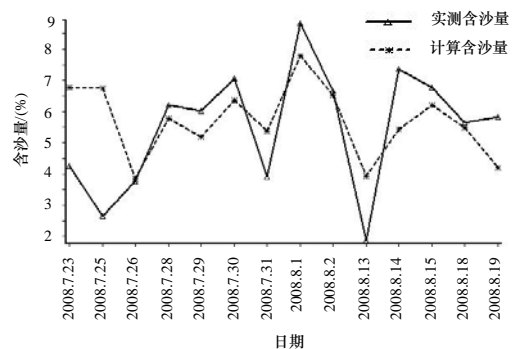


图5 含沙量计算结果与实测数据的对比

(下转第265页)