

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.04.001

黄河多沙粗沙区分布式土壤流失模型支持系统

姚文艺¹,秦 奋²,王玲玲¹,陈界仁³

(1. 黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003;2. 河南大学环境与规划学院,河南 开封 475001;
3. 河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 利用 3S 技术,以黄河多沙粗沙区小流域分布式土壤流失数学模型为服务对象,建立模型支持系统。所建支持系统具有数据管理灵活高效、系统适用面广、易于扩充,以及可以实现各类数据实时生成的优点,达到了流域地形和水沙演进数据的自动提取。提出了虚拟现实环境参照下分类模板定义的方法,提高了遥感影像的分类精度,有效地解决了辨别‘同物异谱、异物同谱’现象的问题,实现了 GIS 功能与专业模型的紧密耦合,两者之间的信息可以进行双向交换和修改。

关键词 分布式侵蚀产沙模型;模拟支持系统;紧密耦合;自动提取

中图分类号 S157 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2009)04-0001-05

Study on the modeling supporting system for distributed soil erosion in the region of abundant sediment and coarse sand of the Yellow River//Yao Wen-yi¹, Qin Fen², Wang Ling-ling¹, Chen Jie-ren³ (1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003; 2. The College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, China; 3. Water Resources & Environment College, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Using 3S (GIS, GPS, and RS) technology, a modeling support system is established and applied in a mathematical model of distributed soil erosion in the small Chabagou basin, in a Yellow River region with abundant sediment and coarse sand. The system has many advantages, such as efficient and flexible data management, wide applicability, easy to extend, and real-time generation of various data. Automatic pick-up of watershed topography and sediment data is realized. The method of defining the classification of the model based on virtual reality is put forward, which improves the classification precision of a remote sensing image. The model can effectively solve the problems of the same object being in a different spectrum and of foreign matter being in the same spectrum. The close coupling of GIS with a professional model is implemented, the model and GIS can exchange information and revise data each other.

Key words : distributed model for soil erosion and sediment yield; modeling support system; close coupling; automatic extraction

分布式土壤流失模型可以对土壤流失空间分布、时间过程进行模拟,目前已在国内外得到较快发展。然而,分布式土壤流失模型的验证和运行往往需要提供更多详细的土壤流失边界参数,如土壤性质、土地利用、水土保持措施、地形等,仅靠传统的土壤流失调查方法和手段已不能完全满足其需求,由此不仅成为制约分布式土壤流失数学模型研发和应用的重要因素之一,而且给定量监测水土保持效果也带来了很大困难。随着计算机技术的快速发展,遥感技术与 GIS 技术的发展和融合,使得人们获取和分析处理流域下垫面信息的能力明显增强,流域土壤流失预测预报模型与 GIS 相结合已成为当前必然趋势,近年来,我国对此做过不少探讨^[1-8]。该研

究以黄土高原多沙粗沙区典型小流域为研究区域,以所研发的分布式土壤流失数学模型为服务对象,在 ArcGIS 支持下,建立了模型支持系统,通过土壤流失预测模型与 GIS 的紧密耦合运行,开展流域土壤流失的预测和评价,为黄土高原水土保持及小流域治理效果评价提供理论依据和实践范例。

1 研究区域概况及土壤流失模型

1.1 研究区域概况

以岔巴沟小流域作为建模和验证对象。岔巴沟流域是黄河一级支流无定河的二级支流,属黄土丘陵沟壑区第一副区,流域面积为 205 km²,沟道长为 26.2 km,河道平均比降为 0.757%,多年平均降水量

约为 450mm,实测最大雨强达到 3.5 mm/min,平均年径流深为 54.0mm,最小年径流深为 29.9mm,径流的年内分配极不均匀,62%集中于每年的 7~9 月。土壤流失极其严重,平均年侵蚀模数为 15 780 t/km²,7~9 月输沙量占流域年输沙量的 90%以上^[9]。

1.2 分布式土壤流失模型

所建模型由 4 层构成:①流域数字高程模型。提取地理信息,建立降雨、水土保持措施类型和数量等参数数据库,形成子数据层。②产流层。主要由入渗、产流、汇流模型构成,计算径流水力参数。③产沙层。进行侵蚀、产沙、输移、沉积模拟,计算坡面、沟道的侵蚀产沙量及其过程。④输出显示层。通过 GIS 系统,使计算的结果进行动态三维或二维显示^[10-11]。第 2 层与第 3 层是紧密耦合的,可以达到产流、产沙并行计算。利用 Horton 入渗理论、土壤非饱和水流运动理论和超渗产流原理分别建立植被截流模型和产流模型,由圣维南方程、坡面水流连续方程模拟汇流过程,求解坡面水流的流速和水深过程,利用运动波方程模拟汇流,由能量平衡原理建立侵蚀产沙模型中的降雨溅蚀模型、坡面水力侵蚀模型、沟坡侵蚀模型、沟槽侵蚀模型,利用泥沙输移比的概念建立泥沙输移模型。流域出口断面的产沙量由各网格及各单元的土壤侵蚀量错开若干个传播时段进行非线性叠加求得。

2 模型支持系统设计与功能实现

2.1 模型支持系统设计

2.1.1 运行环境及配置

系统运行的硬件环境选用普通个人计算机,配置图形工作站,包括 Intel Pentium 4 3.6GHz 或同等运算频率的 CPU。软件环境的操作系统为 Windows 2000/xp,选用 ArcGIS Desktop 9.0 作为 GIS 平台,Microsoft Office 2003 作为支持软件。基于组件式 GIS 产品——ESRI ArcObjects 的 VBA 开发支持系统,将 ArcMAP 的 VBA 环境作为开发平台。

2.1.2 支持系统的总体功能

模型支持系统的总体功能包括基础数据组织、时空数据插值与离散、基于流域地形数据的相关空间分析、基础水文分析、模型运算、数据管理和查询等 7 项。

2.1.3 系统数据库设计

系统数据库设计的总体思路为:采用 ESRI Personal Geodatabase 为主进行数据的存储与管理,同时考虑系统的适应性与运行效率,对于部分水文观测数据和中间数据采用 Microsoft Excel 的方式进行存储与组织。

a. 考虑到分布式土壤流失模型模拟的原始数据,以及基于流域地形数据计算的基础水文数据是整个模型的基础,而这 2 类数据并不因降水场次的改变而变化,因此将这 2 类数据组织为 1 个名为 BasicGDB 的 Personal Geodatabase,作为同一流域各场降水模拟的基础数据。

b. 降水观测数据。考虑系统的适用性,降水观测数据采用 Microsoft Excel 数据格式进行存储,1 场降水的观测数据作为 Excel 数据的 1 个工作簿。

c. 降水插值数据。包括时间插值和空间插值 2 种类型。时间插值后数据仍存储在场次降水的 Excel 工作簿中,其数据结构未发生改变,只是增加了数据行,考虑到 1 场降水的独立性,将每场降水的空间插值结果存储于 1 个 Personal Geodatabase 中,数据为 Raster Dataset。

d. 模拟结果数据。以 ArcGIS GRID 形式存储产流、产沙过程计算结果,以 Microsoft Excel 数据格式保存降水插值结果。

2.1.4 系统开发与模块划分

基于 ArcGIS 支持系统,利用 VBA + ArcObjects 开发模型的各种功能模块,自动完成土壤流失模拟过程中的各种分析计算,对模拟结果进行反演,对计算结果(包括中间结果)进行统一管理与可视化集成,最终形成一套完整的流域土壤流失模拟系统。支持系统功能模块主要包括工程文件管理、基础数据

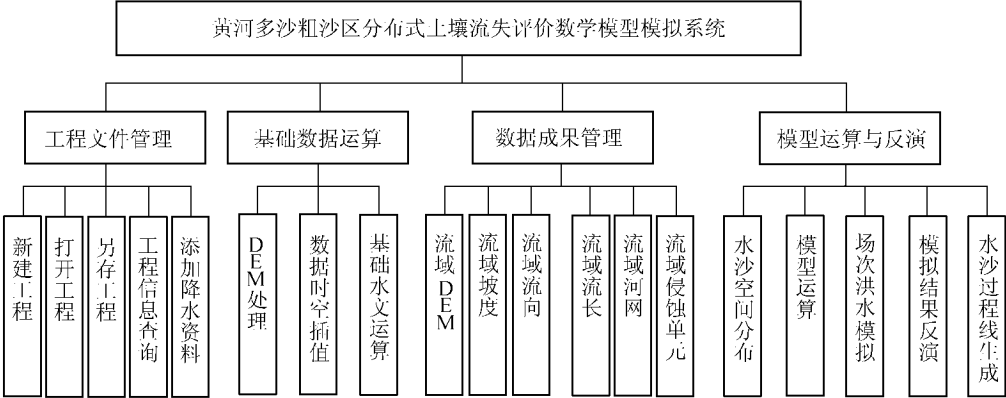


图 1 系统功能结构

据运算、数据成果管理、模型运算与反演 4 个部分。

2.2 支持系统功能的实现

为使模型运算与 GIS 系统紧集成,采取模拟工程的思路进行数据组织,图 1 为系统的总体框架。

2.2.1 工程文件管理

管理模块主要进行分布式土壤流失模拟系统(工程)的建立、打开、保存以及信息查询等操作,用以对模拟工程进行维护和管理。管理模块包括新建工程、打开工程、另存工程、工程信息查询和添加降水资料等。以向导的形式指导用户分步骤定义工程参数、导入模拟的基础数据,最终创建模拟工程文件并生成流域分布式土壤数学模型的整体数据结构,其中,工程文件以 ASCII 码方式存储 打开工程功能主要是读取文件的参数,并加载至内存中,工程信息查询用于读取当前工程的参数并显示出来 添加降水资料是为满足水土保持方案效果评价需求而实现动态增加降水数据。

2.2.2 基础数据运算

基础数据运算主要包括 DEM 处理、数据时空插值与基础水文运算 3 个部分。

a. 地形数据处理。包括 DEM 填洼与流域坡度分析 2 方面的内容。在具体实现时,DEM 填洼借助 ArcObjects 的水文分析接口完成。坡度是最常用的基本地形因子,坡度分析借助于 ArcObjects 的地形分析接口完成。

b. 数据时空插值。数据时间插值是把摘录的流量和降水过程插补成等时段的对时间序列。对于有实测资料时期内的数据采用直线内插,对于时期外的数据则用端点值平延;空间插值采用反距离权重法。在具体实现时,调用 ArcObjects 的插值接口实现数据的空间内插。

c. 基础水文运算。基础水文运算主要包括流向确定、汇流累积、河网提取计算、流长计算与流域侵蚀单元分析 5 个部分。其中,水流方向的确定采用 D8 方法,径流模拟用区域 DEM 的水流方向矩阵来进行。在此过程中使用了权值为 1 的矩阵,如果考虑特殊情况,则可以使用特定的权矩阵,以更加精确计算水流累积值。采用径流量累计值最大法提取河网,并基于 ArcObjects 开发分析流域侵蚀单元的功能模块。数据提取、栅格化、数据叠加和流域侵蚀单元数据生成等步骤的实现完全基于 ArcObjects 的相关栅格数据操作接口与空间分析接口,达到紧密结合。

2.2.3 模型运算与反演

a. 模型运算。在完成各种基础数据处理分析的基础上,通过黄河多沙粗沙区分布式小流域土壤

流失评价预测数学模型进行模拟流域场次洪水泥沙过程(图 2)。

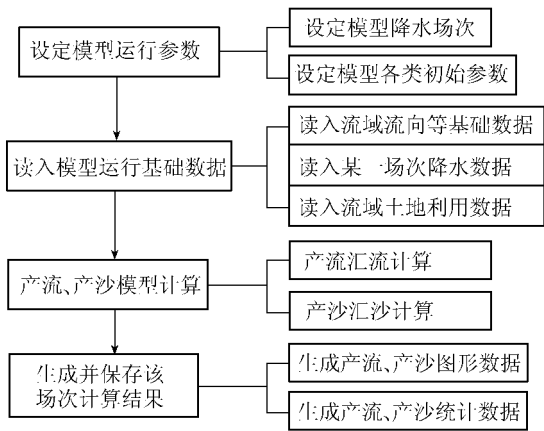


图 2 黄河多沙粗沙区分布式土壤流失数学模型运算流程

b. 成果反演。模型完成计算后,按照某一场次降水的时间顺序,调出每一个时刻的产流(或产沙)结果进行动态显示,为计算结果的动态演示提供操作接口。

c. 流域洪水场次模拟。可以实现场次降水模拟结果的对比验证,查询任一场次降水、流量、沙峰,以及产流、产沙过程线等。

d. 特定点位过程线生成。基于 ArcObjects 的数据操作接口,对各类空间数据进行数据查询,从而实现生成给定某一降水场次下特定点位的降雨过程线、产流过程线与产沙过程线的功能。

2.2.4 数据成果管理

实现对各类空间数据(包括原始数据与计算数据)查询与生成专题图的功能。从数据库中调出相关数据后,利用 ArcObjects 的专题制图接口进行渲染,采用分级显示的方法实现专题图。

2.3 模拟成果及其演示

2.3.1 系统设计验证结果

根据岔巴沟流域 1970 ~ 2000 年 17 场实测暴雨洪水,选取前 9 场和后 8 场洪水分别用于率定和验证。产汇流模拟的验证结果表明,洪峰流量误差除 1989 年 7 月的 1 次洪水较大(达到 - 51.1%)外,其他都在 - 22.5% ~ 43.1% 之间,确定性系数为 0.54 ~ 0.91 径流量平均相对误差为 34.2%。产沙模拟的验证结果表明,产沙量误差介于 - 18.7% ~ 43.4% 之间,平均为 29.6%,确定性系数为 0.51 ~ 0.65 沙峰输沙率相对误差在 - 59.2% ~ 67.8% 之间,平均为 47.2%。可见,产沙量的模拟精度高于沙峰输沙率的模拟精度。

2.3.2 设计暴雨水沙过程模拟及植被覆盖对土壤流失影响的预测

采用设计降水的方法生成各种假设降水过程,

在不改变下垫面条件下,模拟并分析其流域的水沙效应。选择产流、产沙最大且降雨主峰偏后的 1989 年 7 月 1 日降水过程为典型暴雨,以流域各雨量站 100 年一遇($P = 0.01$)、50 年一遇($P = 0.02$)和 10 年一遇($P = 0.1$) 的设计暴雨过程作为模拟的算例。首先,用同频率缩放求 $P_1 = 0.01, P_2 = 0.02, P_3 = 0.1$ 设计暴雨过程,各个站都选择该站产流、产沙最大且降雨主峰偏后的降水过程作为典型暴雨进行同频率放大,求出各时段同频率设计雨量,然后,根据各站点采集雨量的时间段,用暴雨公式计算时段雨量及其相邻的雨量差,再根据典型暴雨进行排位,得各站 0.5 h 的设计暴雨过程;用 DRSMC 计算 3 种设计频率遭遇暴雨后的岔巴沟流域出口曹坪站的径流过程。预测结果表明,与典型实测过程对比,放大后的产洪模拟过程线较为光滑,峰现时间与典型实测过程所出现的洪峰时间相差 0.5 h,这是对降雨量进行 0.5 h 平均概化的原因,总体看,预测的产洪规律与原型是一致的。在不同频率下,流域产沙量随着产流的增加而相应增大,不同频率暴雨条件下预测的产沙过程均与典型实测的产沙过程相似。

为了研究水土保持生物措施对流域产流、产沙的影响,假设了几种不同的植被覆盖度情况,仍以岔巴沟流域 1989 年 7 月 1 日降水过程为例,分别计算同一场暴雨条件下的径流和产沙过程。设计的计算方案有 3 个,即方案 I:流域现有的植被覆盖度;方案 II:全流域植被覆盖度为 75%;方案 III:全流域植被覆盖度为 20%。计算结果表明,在同样降雨条件下,随着植被的增加,洪峰流量减小,同时,含沙量也明显降低。例如当植被覆盖度由 20% 增至 75% 时,洪峰流量减小 30% 左右,沙峰沙的质量分数降低 40% 左右,该结果同岔巴沟流域土壤流失规律是吻合的。

2.3.3 模拟成果演示

模拟成果的空间反演集成了流域降雨、径流深和泥沙空间分布随时间的动态变化过程,具有播放、暂停、快放和慢放等功能(图 3)。

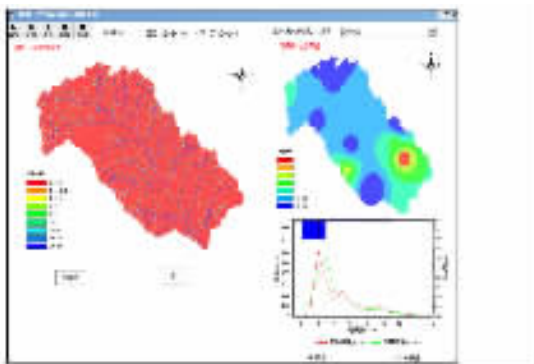


图 3 流域径流深计算成果模型模拟

3 几个关键技术处理方法

3.1 侵蚀环境因子提取方法

3.1.1 土地利用因子

应用 LANDSAT-5 图像和 1/10 000 地形图作为主要信息源,利用 ERDAS 图像处理软件,采用监督分类的方法提取土地利用信息。一般情况下监督分类采用二维视窗环境下的分类模版定义,但这种方法往往难以有效地辨别‘同物异谱’现象。为此,提出了在虚拟地理信息系统的三维视窗中定义分类模版的方法,即把虚拟地理系统的三维视窗与二维全景视窗连接,以三维窗口为参考,参照地形、地貌、野外调绘点的注记等能够增强对象虚拟现实能力的信息,采集训练区的感兴趣区域(AOI),从而定义其分类模版。通过随机选择样本点,运用 GPS 定位,进行野外实地调查,应用 ERDAS IMAGING 的精度评价统计功能,对虚拟现实环境参照下的分类结果进行评价。结果表明,采用此方法的分类精度和 Kappa 系数分别高出二维视窗分类 9.7% 和 0.13。

3.1.2 流域糙率系数

为反映水土保持工程措施对径流泥沙运动的影响,提出了当量糙率系数的概念。所谓当量糙率系数是指淤地坝等工程措施对洪水的阻滞作用相当于增加了边界阻力,从而引起水力参数发生相应改变的一个糙率比拟值。根据综合分析,确定的淤地坝、梯田的当量糙率系数分别为 0.40 和 0.10。

3.1.3 地形地貌因子

a. 地形因子。主要包括高程、坡度和坡向。在 DEM 基础上,以干沟沟底线为基准,在垂直于干沟沟底线的方向上,以行为单元,寻找最低点,然后计算各点与最低点的差值,其差值即为所求相对高程;由最小二乘法对所划分的网格顶点及其相邻 4 个点的高程作平面拟合,由此求得流域坡度;将单元拟合平面的法线在水平面上的投影方位角定义为坡向。按 22.5° 的方位角间隔由正北顺时针划分为 16 个方位。

b. 地貌因子。侵蚀地貌单元分为梁峁坡、沟坡和沟槽。利用 ArcView 空间分析模块中的分析菜单 MapQuery 功能,根据坡度分析结果,选择坡度范围 0° ~ 25° 作为岔巴沟流域梁峁坡提取结果;同梁峁坡的分析方法,选择坡度范围 25° ~ 45° 作为沟坡提取结果。

将梁峁坡、沟坡和沟槽提取结果图对应的栅格文件(20 m × 20 m)转化为矢量文件,然后采用 GeoProcessing 模块中的 Merge Theme Together 功能,最后可得岔巴沟流域侵蚀单元叠合分析文件。

3.2 降雨空间分布输出

将流域进行栅格化,建立流域降雨空间分布插值边界,建立雨量站点矢量图,包含站点的空间地理坐标和实测降雨量。选取一场或多场实测降雨过程,从数据库导入雨量数据到站点矢量图。选定需要插值的空间区域(可以是流域边界、行政边界或者是用户指定的任意边界),以动态的栅格图层并配以一定的透明度将计算结果叠加在流域底图上(图4)。

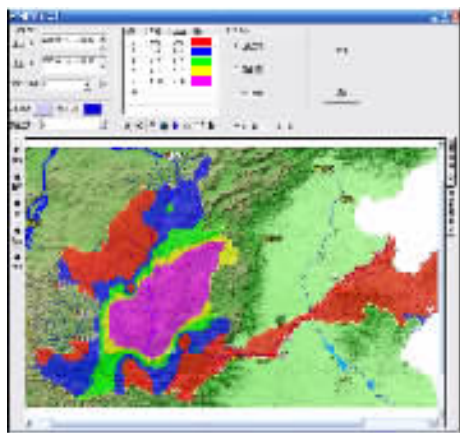


图4 流域降雨动态分布输出

3.3 土壤流失模型与 GIS 的紧密耦合

由于 ArcGIS 的源代码无法获得,为此提出三方面的处理技术实现土壤流失模型与 GIS 的紧密耦合。首先,选取 ArcGIS8.x 后组件系统,其每一功能都提供了相应的接口,通过接口与 ArcGIS 进行全方位通信,实现数据模型所需的数据管理、分析计算和显示等功能,这些结合是无缝的;第二,在开发方式上,采用 ArcGIS 提供的开发工具进行开发,从而可以完全实现 ArcGIS 的所有功能;第三,将系统的界面、数据库统一在 ArcGIS 系统中。

从参数传递和运算过程看,产汇流模型和产输沙模型的计算结果互为参数,具有反馈关系,也形成了产汇流模型与产输沙模型之间紧密耦合的功能。

4 结 语

a. 利用地图数据源生成 DEM,结合 GIS 的空间分析功能,达到了流域地形和水沙演进数据的自动提取,在虚拟现实环境参照下完成分类模版定义,在遥感影像错分纠正过程中取得了较二维图像更高的辨别率,提高了分类精度,可以更好地辨别‘同物异谱、异物同谱’的现象。

b. 利用当量曼宁糙率系数反映各类水土保持措施对产汇流的影响,从而实现了模型对水土保持治理效益进行评价预测的功能。

c. 紧密结合地理信息系统进行参数的网格化,从而使之从输入、计算、输出、显示过程都和 GIS 紧

密耦合在一起,做到了模型和 GIS 的紧密耦合。分布式产输沙模型计算以分布式坡面流运动波数值模拟为基础进行耦合求解,实现了产汇流模型与产输沙模型的耦合,根据每个网格各个时段的水深、流速、流量同步依次计算出网格各个时段的产沙量。

由于研究问题的技术难度大,虽然取得了一定的进展,但有不少问题仍待进一步探索,例如如何减少 RS 识别误差和 GIS 插值误差的方法等还需要加强研究。

参考文献:

- [1] 唐莉华,张思聪.北京市小流域水土保持综合治理规划模块开发研究[J].中国水土保持,2004(4):28-30.
- [2] 贾媛媛,郑粉莉,杨勤科,等.黄土丘陵沟壑区小流域水蚀预报模型构建[J].水土保持学报,2004,18(2):5-7,16.
- [3] 贾媛媛,郑粉莉,杨勤科.黄土高原小流域分布式水蚀预报模型[J].水利学报,2005,36(3):328-332.
- [4] 于书霞,王宁,朱颜明,等.基于地理信息系统的土壤侵蚀研究[J].水土保持通报,2001,21(3):20-23.
- [5] 刘海涛,秦其明.基于 WebGIS 的土壤侵蚀模型研究及应用[J].水土保持学报,2001,15(3):52-55.
- [6] 刘纪根,蔡强国,刘前进,等.地理信息系统与侵蚀产沙模型集成研究述评[J].水土保持学报,2003,17(6):77-80.
- [7] 祁伟,曹文洪,郭庆超,等.小流域侵蚀产沙分布式数学模型的研究[J].中国水土保持科学,2004,2(1):16-21.
- [8] 惠二青,黄钰铃,刘德富,等.流域土壤流失携带污染物量的计算方法[J].水资源保护,2006,22(3):33-35.
- [9] 姚文艺,李占斌,康玲玲.黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[M].北京:科学出版社,2005:68-71.
- [10] 杨涛,陈界仁,姚文艺,等.基于 DEM 的黄土丘陵区动力学流域水沙数学模型应用研究:以黄河中游两个典型流域为例[J].水动力学研究与进展:A 辑,2007,22(5):583-591.
- [11] 姚文艺,李勉,史学建,等.黄土高原水土流失数学模型(第一期)研发初步设计报告[R].郑州:黄河水利科学研究院,2007:45-46.

(收稿日期 2008-16-27 编辑 方宇彤)

