

文章编号: 1000-0585(2002)01-0025-09

小流域综合管理信息系统集成研究

刘高焕¹, 朱会义¹, 蔡强国¹, 甘国辉¹,

Ferko Csillag², Virginia Maclaren²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101, 2. 加拿大多伦多大学地理系)

摘要: 本文介绍的小流域管理与决策支持信息系统, 是以小流域综合治理与科学决策为目标, 以地块为基本操作单元的土壤侵蚀模型、生产潜力模型、成本效益模型与 GIS 的集成系统。该系统具有数据管理、查询、更新、处理、模型分析和输出等多种功能。分析模型与 GIS 集成的基本单元是地块 (land unit), 在地块上实现模型参数的提取与传递、模型计算及显示与分析。在分析各种集成方式的基础上, 选取了动态连接库及其扩展方式, 实现了土壤侵蚀模型、生产潜力模型、成本效益模型、规划模块与 GIS 的紧密集成, 以统一的图形用户界面, 服务于水土保持的现代化管理和小流域综合治理。

关 键 词: 用户模型; GIS; 集成; 地块

中图分类号: P208; X32 **文献标识码:** A

随着数学方法在科学研究和生产实践中的广泛应用, 产生了大量的应用性的数学模型, 在地理学领域中就有诸如土壤侵蚀模型、水文过程模型、生产潜力模型、区域分析模型等一大批模型或模型群。但这些模型在生产实践中并未得到广泛的应用。就其原因, 一是部分模型的实用性差, 二是模型与用户之间缺乏沟通的桥梁。解决这一问题的关键是把模型软件化, 使模型在黑箱状态下供用户操作。而模型软件化的捷径是模型与现有应用软件系统的集成, 对地学模型而言主要是模型与 GIS 的集成^[1,2]。但是由于模型与 GIS 的数据结构不同、数据输入输出格式不同、用户界面不统一以及计算模块间数据通讯方式的差异等原因, 使得面向用户的模型与 GIS 的集成存在一定的困难。这已成为限制模型和 GIS 应用的主要障碍之一^[3]。

黄土高原是水土流失的重点地区, 该区大范围强烈的沟谷发育和地表侵蚀导致耕地减少、土壤表层养分流失, 并引起主要河流的大量泥沙淤积^[4]。以小流域为单元进行综合治理, 同时考虑各种水保措施的经济效益与生态效益, 是一条有效的途径。小流域综合管理与决策支持系统就是一个应用模型和 GIS 紧密集成的系统, 它以黄土高原小流域治理与管理为背景, 通过把土壤侵蚀模型、生产潜力模型、成本效益模型与 GIS 相连接, 应用于小流域水土流失治理规划及决策, 并检验治理方案的实施效果。系统中, 由 GIS 的空间分析功能, 将小流域划分为具有相同或相似地理环境特征的地块单元 (景观单元), 在

收稿日期: 2001-06-14; 修订日期: 2001-11-20

基金项目: 国家重点基础研究资助项目 (G1999043508); 中科院地理所创新项目 (AD7095)

作者简介: 刘高焕 (1959-), 内蒙古土默特左旗人, 男, 中国科学院地理科学与资源研究所、资源与环境信息系统国家重点实验室研究员。主要从事遥感、地理信息系统应用研究。

地块单元内,所有地学特性如高程、坡度、坡向、土壤、温湿、热量及人为措施等,都是一致或相近的,因而其地学参数、环境要素是相同的。所有模型都在统一的地块单元上进行计算,从而形成集成化实用的信息系统。

1 系统结构与功能

1.1 系统结构

小流域综合管理与决策支持信息系统是一个多功能的复合系统,属于区域性的专题地理信息系统。主要包括信息采集与生成、数据库系统、应用模型和决策支持等模块(图1)。土壤侵蚀模型、生产潜力模型和经济效益模型是系统的核心模型,而汇流网络模型则是确定地块间水沙运移的辅助模型,模拟小流域的水文特征,计算汇流网络,为其它模型提供参数。数据库为三个模型的运行提供数据支持。土地管理者的管理决策行为则是以三个子系统所提供的信息为依据来进行的,并可通过模型预测和检验治理方案的实施效果。

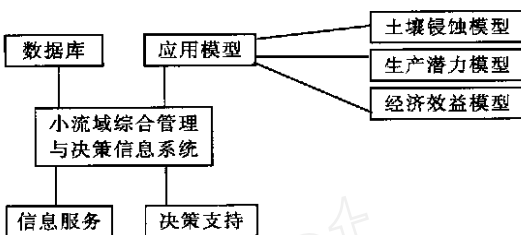


图1 系统结构图

Fig. 1 The system structure

1.2 系统功能

作为一个信息系统,可对流域内的土壤侵蚀信息、作物产量信息、气候信息和经济效益信息等进行管理和处理、进行流域级模拟预测以及统计分析等,包括:

(1) 数据管理功能。对属性数据和图形图像数据的录入、分类、整理、修改、统计等。在流域管理中,涉及大量专题数据,如地形、土壤、植被、土地利用、气候参数、生产成本等数据。这些数据既有空间的,也有非空间的,需要进行统一管理 with 操作。

(2) 数据查询与更新。为了给土地管理者提供信息服务,有效地按照系统所提供的数据和信息作出合理的水土保持决策,进行流域管理与治理,本系统具备较强的数据查询和更新功能。

(3) 数据处理功能。对于属性数据和图形图像数据,经过模型库的模型计算,产生计算结果。尤其是对地形数据进行处理,产生模型计算所需要的地理单元数据,再通过辅助模型和三个核心子模型进行运算,产生最后的计算结果。

(4) 结果显示输出功能。对于计算结果,既可按表格形式输出,也可以按图形输出,生成各种专题图。

(5) 空间过程的分析模拟。对流域空间范围内的径流进行水文过程分析和模拟,计算水沙运移的汇流网络。该模型分别按网格和地块两种方式进行模拟运算。

(6) 模型建立。应用系统提供的模型构建功能,可方便地建立土壤侵蚀模型、生产潜力模型、经济效益模型,为流域管理者的决策行为提供支持。

(7) 模型参数的相互传递和转换。模型所需的地学参数和社会经济数据,可以在系统内自动获取,并可互相调用和转换。

2 集成方式

模型与 GIS 的集成存在多种方式^[5~8], 包括文件传输方式、系统调用方式、动态数据交换方式 (DDE)、远程过程调用方式 (RPCs)、动态链接库方式 (DLLs) 以及组件方式 (ActiveX) 等。这些集成方式各有其优势与不足, 难易程度也不同。

对小流域综合管理与决策支持系统而言, 由于系统的核心模型土壤侵蚀模型、生产潜力模型、社会经济模型之间以及各模型与 GIS 系统间, 需要进行大量的属性数据和图形图像数据的传递与调用, 因此, 文件传输方式、系统调用方式、DDE/RPC 方式等都难以满足该系统的需要。而组件方式虽可进行大量的数据传输, 但目前 MAPOBJECTS 等 GIS 组件尚缺乏空间分析的功能, 也不适合本系统的集成。根据上述对模型与 GIS 集成方式的分析, 考虑到用户界面的统一性、模型与 GIS 连接的紧密性、系统的稳定性以及编程工作的难易, 本系统的集成方式采用 DLL 及其扩展方式。

根据系统结构和功能的要求, 对现有的 GIS 软件系统进行分析筛选, 最终选取 ARCVIEW 作为软件平台, 兼顾空间数据和非空间数据这两种不同性质的数据特点, 有效地实现了空间数据和专题数据的操作处理和管理。利用 ARCVIEW 软件的二次开发语言, 把土壤侵蚀模型、生产潜力模型、成本效益模型等程序化, 实现空间过程的分析模拟以及模型的建立和运算; 通过对视图、主题、图表等对象的编程操作, 使用户输入的气候参数、生产成本数据以及地形分析数据和模型分析结果等存贮在数据库中。这样, 模型分析需要的生产潜力、土壤侵蚀及生产成本等信息, 都可在数据库中直接读取, 实现了模型与 GIS 间以及模型与模型间参数的互相调用和转换。而这一直是模型与 GIS 集成中的难点。

3 模型功能的编程实现

系统的模型集成是以地块为基础的。针对流域的特点, 将其划分为若干地块, 每一地块都具有相同或相似的地学特征。地块单元的获取主要由 GIS 的空间叠加功能来实现。由 DEM 提取地形、坡度、坡向信息, 由土地利用和土壤数据提取地表覆盖和土壤特征信息, 依据流域特点, 设定各参数层的分级体系与分级指标, 形成相应的参数层, 将所有参数层进行叠加, 并进行地块单元的归并与综合处理, 形成具有相对单一特征的地块单元。不同区域地块单元的尺度视当地的地形、地貌、土地利用条件而定, 地块单元对小流域的地形、地貌、土地利用状况等条件反映越充分, 模型分析的结果越接近实际情况。

3.1 土壤侵蚀模型

小流域综合管理与决策支持信息系统中的土壤侵蚀模型是一个空间过程模型。该模型模拟黄土高原小流域降雨在地表形成的径流过程, 进一步模拟分析地表的土壤侵蚀过程, 从而得出小流域的土壤侵蚀产沙^[9]。该模型以地表不同类型的地块单元为分析基础。它综合考虑了流域地形表面特征、地貌结构、以及土地利用和土地覆被状况。在地块单元上, 土壤侵蚀模型进一步考虑小流域水沙汇流的地块顺序以及不同类型地块的侵蚀特性, 模拟分析小流域的土壤侵蚀过程, 最终输出流域侵蚀产沙量 (图 2)。因此, 模型的编程实现要解决的关键问题就是地块间水沙运移流路的确定。虽然目前已有一些确定流路的研究成果, 但其算法都是基于栅格而不是基于地块单元^[10]。在本系统的集成中, 开发了地块汇流网络模型, 来确定地块单元间的水沙流路。

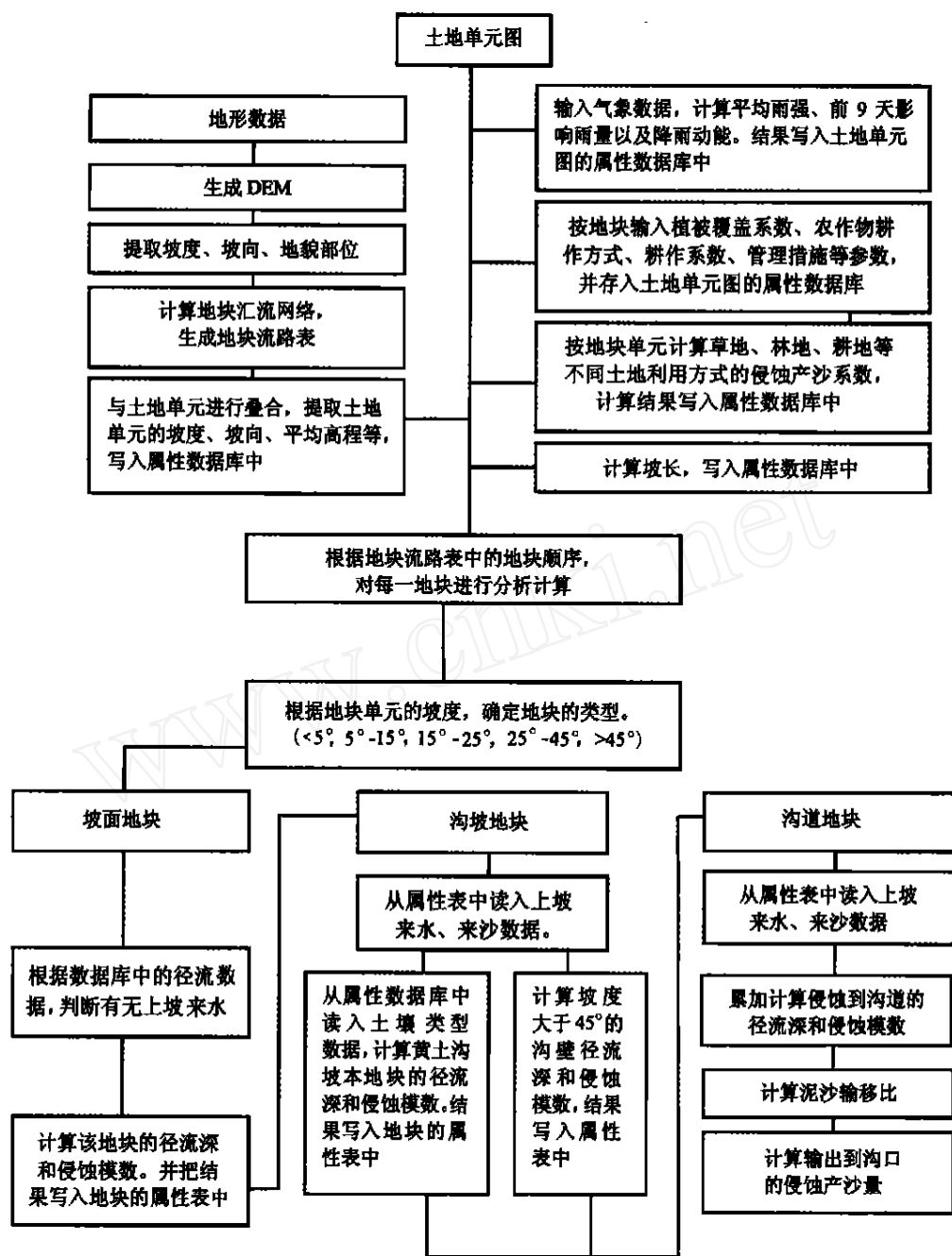


图 2 土壤侵蚀模型算法流程图

Fig. 2 The arithmetic process of erosion model

土壤侵蚀模型的输出较为简单, 但运行该模型需要的初始输入数据则很多 (表 1)。

这些数据可通过以下几种方式获取: (1) 用户输入。气象数据, 部分自然地理数据和土地利用数据如地块单元、土壤类型、土地利用、植被覆盖度都需要用户直接输入或利用

现有的数据资料。(2) 利用现有的 GIS 软件的分析处理功能如叠置分析、统计分析进行提取。地块单元的高程、坡度、坡向数据就是利用现有表面分析功能，由地形等高线生成数字地形模型，然后再进行空间分析求出流域的坡度、坡向，再把矢量地块单元图与表征地形数据的栅格图进行叠置分析，从而得到每一地块单元的高程、坡度、坡向等地形数据。(3) 在主模型运行之前，利用编程工具 AVENUE 对主模型调用的侵蚀参数进行预处理。植被季节性覆盖度的侵蚀产沙系数以及耕作措施的侵蚀产沙系数等都在主模型运行前，通过模型运算求得结果，并存贮在属性数据库中，供主模型进一步调用。

表 1 土壤侵蚀模型的参数列表

Tab. 1 The parameters of erosion model

| 数据类别 | 基本参数 | 说明 | 处理方法 |
|--------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 气象数据 | 日降雨量；降雨历时；前 9 天的影响雨量等 | 用于分析降雨强度和土壤水分状况对土壤侵蚀过程的影响 | 用户输入 |
| 自然地理数据 | 地块单元；地块单元高程、坡度、坡向、坡长、土壤质地、土壤类型等 | 用于模拟小流域水沙运移过程以及地形、土壤因子对土壤侵蚀过程的影响 | 用户输入和利用 GIS 分析功能进行提取 |
| 土地利用数据 | 地块单元的土地利用类型；植被覆盖度等 | 考虑地块单元内林地、草地、耕地等不同的土地利用方式对侵蚀产沙过程的影响 | 用户输入 |
| 基本侵蚀参数 | 农作物季节性覆盖度的侵蚀产沙系数；耕作措施的侵蚀产沙系数等 | 考虑农作物不同生长阶段、梯田、坡耕地等耕作措施对侵蚀产沙过程的影响 | 模型参数预处理，编程计算 |

3.2 生产潜力模型

生产潜力模型是一个基于地块单元的数学模型。它通过综合考虑区域气温、降雨、蒸发、光照等气候条件、地表地形和土壤状况以及作物类型和耕作管理措施等因素，分析计算各地块单元的作物产量。其核心模型用 C 语言编写在 Yield.dll 动态连接库中。要在小流域综合管理系统中实现该模型的功能，需要解决的主要问题是 DLL 模块与 GIS 系统的连接，包括 DLL 函数的调用和输入输出参数的处理。DLL 函数的调用利用 AVENUE 很容易实现（图 3），而输入输出参数的处理数据类型复杂（表 2），需要分别处理。

表 2 作物产量模型的参数列表

Tab. 2 The parameters of yield model

| 数据类别 | 基本参数 | 说明 | 处理方法 |
|---------|---------------------------------|--|--------------------------|
| 时间、位置数据 | 小流域的名称、经纬度；年份；播种期 | 用于确定小流域的空间位置，根据空间位置结合气象数据和地形数据，分析地块单元的热量状况 | 用户输入 |
| 气象数据 | 逐日平均温度；平均湿度；最小湿度；云量；风速；日降雨量及历时 | 用于分析地块单元温度、湿度、热量、降水状况对作物生长的影响 | 属性表输入 |
| 自然地理数据 | 陡坡地、缓坡地、梯田的储水能力；土壤参数；地下水埋深 | 用于分析不同地形部位的地块单元的土壤水分状况对作物生长的影响 | GIS 生成 |
| 土地利用数据 | 土地单元；面积；高程；坡度；坡向；土地类型；土壤类型；坡面状况 | 提供产量分析需要的基本地表数据，这些因子影响到作物生长过程中的温湿、热量、水分、养分条件 | 从侵蚀模型运行结果中读取或利用 GIS 功能提取 |
| 作物数据 | 作物类型；根系生长率；作物类型数、种植面积比 | 考虑各种作物类型在不同地块单元水热条件下的生长状况 | 用户输入 |

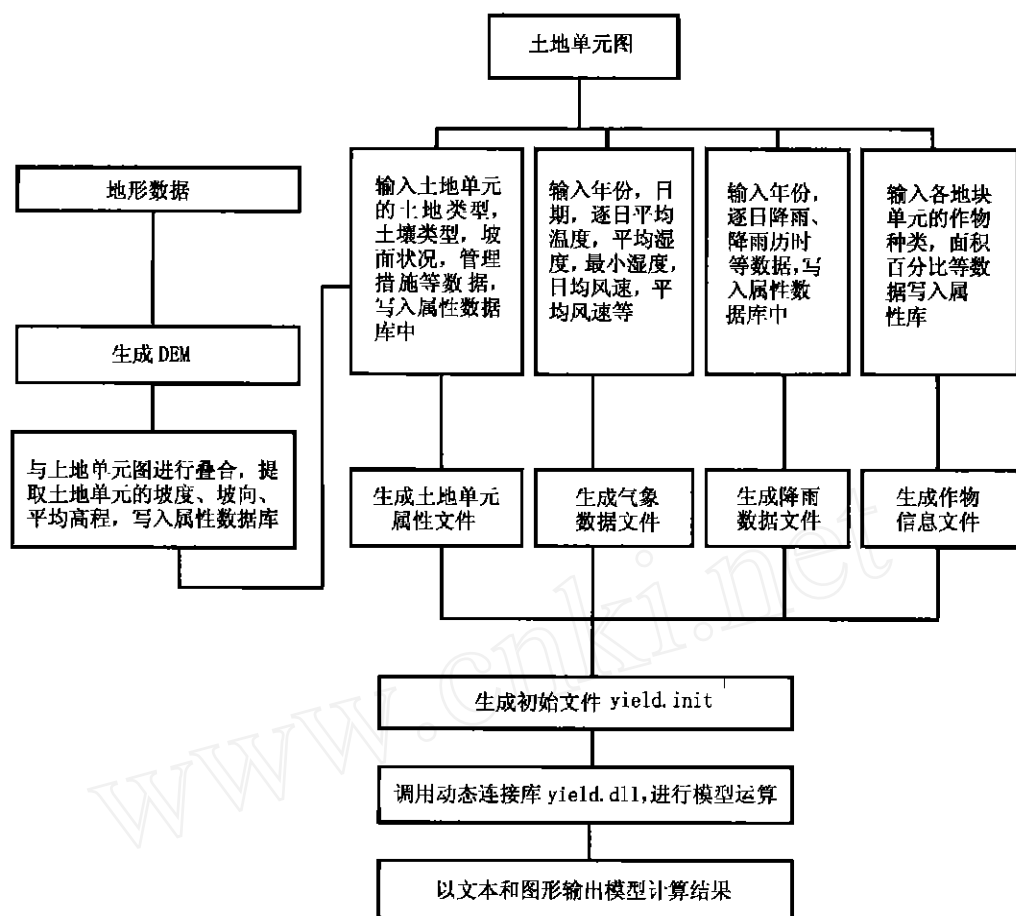


图 3 作物产量模型算法流程

Fig. 3 The arithmetic process of yield model

3.3 经济效益模型

成本效益模型是一个基于地块单元的离散点模型, 即模型基于一些特定的地块单元, 而不覆盖整个区域。把该类模型集成到 GIS 环境中, 可以扩展其空间特性, 使不同地块单元的成本效益分析在相同模型的支持下一性完成, 并以图形的方式显示出结果, 反映其空间差异 (图 4)。由于成本效益模型的分析过程对每个地块独立进行, 涉及的参数又多, 所以数据输入方式是要解决的重点问题。

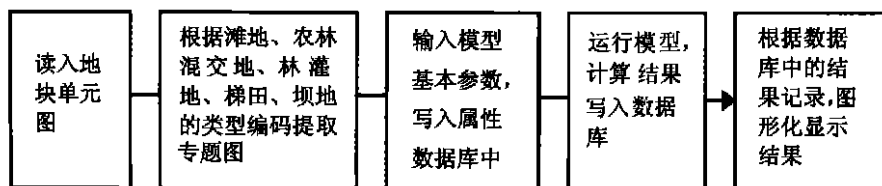


图 4 成本效益模型的算法流程

Fig. 4 The arithmetic process of cost-benefit model

成本效益模型包括五个方面^[11]：滩地效益分析；农林混作效益分析；林地与灌木林地效益分析；梯田效益分析；坝地效益分析。每一种功能的实现涉及一系列计算公式，每一个公式又需要众多的参数（表 3），这些参数针对具体的地块单元，必须设计针对地块单元的图形化的用户输入方法。集成工作中，利用 AVENUE 编程工具增加了这一功能。

表 3 成本效益模型的参数列表

Tab. 3 The parameters of cost-benefit model

| 功能模块 | 基本输入参数 | 说明 | 处理方法 |
|-------------|--|-------------------------------------|--------------------------|
| 滩地成本效益分析 | 年度建设投入（年度石质、水泥、土质河堤每米建设费用，各类河堤的长度，土地整理费用，整理面积，年度河、渠、道路单位长度建设费用以及长度）； 年度维护投入（年度石质、水泥、土质河堤每米维护费用，年度河、渠、道路单位长度维护费用）； 年度滩地单位面积的减沙收益（年度滩地的减沙量，年度水库清淤每立方米的费用）； 年度各种作物种植收益（各种作物的单位市场价和政府价、单位面积的实际产量和不同销售渠道的份额，单位时间人工、畜力费用和耗时，各种化肥用量和价格，地膜使用量和价格） | 滩地成本效益主要包括各类河堤的建设、维护投入；减沙效益以及作物种植收益 | 用户输入，部分数据如地块面积等可从属性数据库读取 |
| 农林混交地成本效益分析 | 年度作物种植收益（各种作物的单位市场价和政府价、单位面积的实际产量和不同销售渠道的份额，单位时间人工、畜力费用和耗时，各种化肥用量和价格，地膜使用量和价格）； 果树收益（各种果品的单位销售价格和产量，化肥的使用量和单位价格，人力、畜力、机械在生产、维护、收获各阶段的使用量和单位时间价格）； 减少水土流失的收益（减少的土壤侵蚀量，水库清淤每立方米的费用） | 农林混交地的成本效益包括作物种植收益、林果种植收益以及减沙效益等 | 用户输入，部分数据如面积等可从数据库读取 |
| 林灌木林地成本效益分析 | 减少水土流失的收益（减少的土壤侵蚀量，水库清淤每立方米的费用）； 销售和使用收益（各种林灌产品的单位销售价格和产量）； 林灌种植、维护、收获投入（化肥的使用量和单位价格，人力、畜力、机械在生产、维护、收获各阶段的使用量和单位时间价格） | 林灌地成本效益包括减沙效益、林灌产品种植收益和投入 | 用户输入，部分数据如面积等可从数据库读取 |
| 梯田成本效益分析 | 梯田建设费用（人力、畜力、机械在梯田修建中的使用量和单位时间价格）； 梯田维护费用（人力、畜力、机械在梯田维护阶段的使用量和单位时间价格）； 种植收益（各种作物的单位市场价和政府价、单位面积的实际产量和不同销售渠道的份额，单位时间人工、畜力费用和耗时，各种化肥用量和价格，地膜使用量和价格）； 减少水土流失收益（减少的土壤侵蚀量，水库清淤每立方米的费用） | 梯田的成本效益包括梯田的建设、维护投入；作物种植收益以及梯田的减沙效益 | 用户输入，部分数据如面积等可从数据库读取 |
| 坝地成本效益分析 | 坝地建设费用（人力、畜力、机械在坝地修建中的使用量和单位时间价格，建坝需要的土方数和单位价格）； 坝地维护费用（人力、畜力、机械在梯田维护阶段的使用量和单位时间价格，维护需要的土方数和单位价格）； 年度各种作物种植收益（坝地淤地面积，各种作物的单位市场价和政府价、单位面积的实际产量和不同销售渠道的份额，单位时间人工、畜力费用和耗时，各种化肥用量和价格，地膜使用量和价格） | 坝地成本效益包括坝地的建设、维护投入、作物种植收益以及淤堤坝的减沙效益 | 用户输入，部分数据如面积等可从数据库读取 |

3.4 其他辅助功能

在集成了土壤侵蚀模型、生产潜力模型和成本效益模型之后，考虑到对小流域综合管理的进一步决策支持，系统中还增加了流域规划功能，使流域管理者在了解模型分析结果的基础上，根据本流域的治理要求，进行有效的土地利用和建设规划。该功能通过连接

GIS 的基本功能和模型分析结果来实现。

此外,还集成了流域水文分析功能,包括坑洼识别、填充功能;汇流网络功能;沟道识别功能、流路排序功能;流长计算功能和流域描述功能等,以期对土壤侵蚀分析和流域管理提供辅助支持。

4 系统应用

在小流域综合管理与决策支持系统的集成过程中,以山西省汾河上游小流域的基本地形、土地利用、气象数据为基础并结合实测数据,对系统中的核心模型功能进行了大量的验证与调试,使该系统成为小流域综合管理的一个有效的决策支持工具。

考虑到高强度、大雨量降雨对小流域土壤侵蚀的重要影响,利用羊道沟流域 1963 - 1968 年的 22 次的天然降雨进行精度检验,通过预测值和实测值取对数后进行整体偏差的比较,模型分析结果的整体精度为 77.8%,具有较好的预测效果。模型应用到汾河上游的狼窝沟小流域和内蒙古的艾来色泰小流域,只要经过土壤侵蚀模型参数的修正,也能得出同样精度的结果。

同时也对生产潜力模型进行了小流域验证。由于生产潜力模型计算的结果是流域内各地块单元的作物生产潜力,而实际观测调查到的资料是作物单位面积的实际产量,两者比较,生产潜力比实际产量普遍高出 20% ~ 50%,虽然不反映模型分析的精度,却也能说明生产潜力模型分析的有效性。

5 结语

随着空间管理的不断深化,GIS 被广泛地用于解决复杂的空间问题。但 GIS 系统不可能提供用户所需要的所有功能,因而,GIS 应用系统的开发就更加重要。小流域综合管理与决策支持系统就是这类应用系统的一个范例。该系统通过把土壤侵蚀模型、生产潜力模型、成本效益模型与 GIS 紧密集成,实现了模型与模型间以及模型与 GIS 间参数的自动调用和转换,解决了系统集成中的难点问题^[12]。该系统应用到山西狼窝沟小流域水土保持规划中取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 陈述彭,等.地理系统科学与地理信息科学.地理研究,1996,15(2):1~11.
- [2] 陈述彭,等.地学信息图谱研究及其应用.地理研究,2000,19(4):337~344.
- [3] Fu Pinde, Rich Paul, Wang Jue. Integration of GIS with user models. http://www.ersi.com/~integration_of_gis_with_user_models.html.
- [4] 廖克.黄土高原地区人地关系及其调控初步分析.地理研究,1997,16(增刊):1~9.
- [5] 钟耳顺,等. GIS 组件化与组件式 GIS 研究.见:中国海外地理信息系统协会 1998 年年会论文集.中国地理信息系统协会,1998.
- [6] 钟耳顺.地理信息系统应用与社会背景分析.地理研究,1995,14(2):91~97.
- [7] 黄雪樵.地理信息系统支持下的坡面太阳辐射计算.地理研究,1992,11(3):80~84.
- [8] 王学军.空间分析技术与地理信息系统的结合.地理研究,1997,16(3):70~75.
- [9] 蔡强国,陆兆熊.人类活动对黄土高原小流域侵蚀产沙的影响.见:晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统

应用研究. 北京:科学出版社,1992.

- [10] 任立良,等. 基于 DEM 的水文物理过程模拟. 地理研究,2000,19(4):369~376.
- [11] Maclaren V W, Warren C. SEMGIS Economic model. 见:晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究. 北京:科学出版社,1992.
- [12] 郭腾云,等. EGIS 的构建方法及其应用探讨. 地理研究,1999,18(增刊):94~102.

A land-unit based integration method of geographic information system for small watershed management

LIU Gao-huan¹, ZHU Hui-yi¹, CAI Qiang-guo¹, Gan Guo-hui¹
Fenko Csillag², Virginia Maclaren²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. University of Toronto, Toronto, Canada)

Abstract : The small watershed management information system is an integrated system of GIS and erosion model, land productivity model and cost-benefit analysis model. It can be applied in watershed planning and management in Loess Plateau. The system is developed for decision support in soil and water conservation with the functionalities of data management, data query, database updating, displaying, output and model analysis. The basic geographic unit for system integration is land-unit. The land-unit was defined as a piece of land with the homogeneous geographic characters such as elevation, soil type, land-cover, slope, aspect, etc. Based on the land-unit, three model groups were integrated with GIS. In order to realize those functions, basic integration methods were analyzed and the integration method of DLL and its extension was adopted. Then based on the method accompanied with Avenue programming language, the system was fully integrated in Arcview environment.

A landunit based flow network model was developed for simulating the processes of drainage and sediment transportation among land-units, and it provides parameters for erosion model, economic model and yield model. The soil erosion model calculates soil loss for each land-unit in a watershed. Yield model and socio-economic model estimate crop productive and economic benefit in the watershed, such as river beach, check dam, agro-forest, terracing, etc. These three models are integrated with each other and fully linked to database system. Based on the result of model simulation, the soil and water loss, land productivity and economic benefits in a watershed can be estimated for different land planning and engineering strategies. The optimized management for watershed can be done through comparisons of varied planing.

The arithmetic process and parameters of each model are also described in this article.

Key words : user model; GIS; integration; land-unit