

流域模拟模型与GIS集成研究现状与展望

姚长青, 杨志峰, 赵彦伟

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 综述了流域模拟模型的发展和现状。从数据集成的角度, 把流域模拟模型与地理信息系统集成方法归纳为互连式、共连式、流域模拟模型嵌入GIS和GIS嵌入流域模拟模型四种类型, 讨论了各类集成方法的技术特点、应用和优缺点; 并从数据、GIS技术、流域模拟模型和研究人员四个方面分析了流域模拟模型与GIS集成存在的问题; 最后指出基于数字流域的综合集成方式将是流域模拟模型与GIS集成的发展方向。

关键词: 流域模拟模型; GIS; 集成; 数字流域

中图分类号: TP79; S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)06-0138-04

Development of Research on the Integration of Watershed Simulation Model and GIS

YAO Chang-qing, YANG Zhi-feng, ZHAO Yan-wei

(School of Environmental Sciences, Beijing Normal University,

State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing 100875, China)

Abstract: A summarization on the status and development of watershed simulation model was made. In terms of data integration, watershed simulation model with GIS was divided into four categories: intercommunication, GUI, watershed simulation model embedded in GIS and GIS embedded in watershed simulation model, and the characteristics, applications and problems of each category were analyzed. Also, problems existing in the integration of watershed simulation model and GIS were discussed in the view of data, GIS technology, watershed simulation mode and researchers. In the final, it pointed out that the synthetic integration method based on digital valley will be the development trend of the integration of watershed simulation model and GIS.

Key words: watershed simulation model; GIS; integration; digital valley

流域模拟模型对识别流域过程, 了解流域发展动态起到重要作用。但由于地表层、亚地表的时空复杂性, 流域模拟建模需要大量的描述物理、化学和生物特性变化的空间数据和非空间数据, 数据管理成为建模的一项重要工作, 而地理信息系统(Geographical Information System, GIS)可用于空间数据及非空间属性数据的获取、存储、分析和显示。因此, 流域模拟模型与GIS的集成成为一种趋势^[1], 成为水文、水资源领域的研究热点。本文在综述流域模拟模型研究现状的基础上, 探讨了流域模拟模型与GIS的集成问题, 并对流域模拟模型与GIS的集成提出展望。

1 流域模拟模型的研究现状

流域模拟模型的出现与计算机的诞生分不开, 60年代开始其发展历程, 70~80年代是流域模拟模型的蓬勃发展时期, 90年代至今流域模拟模型进入以分布式物理模型为主, 集成多种流域过程, 全面考虑流域各种因素的综合发展时期。从流域模拟模型发展来看, 是从水文、土壤等单要素的模拟建模发展起来的, 许多学者也将其归入到水文模型、土壤侵蚀模型等领域。

流域水文模型的研究大约始于20世纪50年代, 60、70年代是蓬勃发展时期, 涌现出了大量的流域水文模型。比较著名的包括美国的Stanford模型和Sacramento模型、日本国家防灾研究中心的Tank模型、澳大利亚代表性流域模型(ARBM)以及中国的新安江模型(XJM)等^[2]。这一时期的流域水文模型主要是概念性模型。80年代以后, 流域水文模型开始面临许多新的挑战, 包括水文循环规律和过程如何随时空尺度变换而变化的问题, 水文过程的空间变异性问题等^[3]。而概念性模型自身存在许多不足和缺陷, 无法适应这些挑战, 这一时期流域水文模型处于相对缓慢的发展阶段。90年代以来, 计算机技术、地理信息系统(GIS)、数字化高程模型(DEM)和遥感(RS)技术迅速发展, 促进了基于物理基础的分布式和半分布式流域水文模型迅速发展和应用^[4-6]。其中代表性模型有SHE模型、TOPMODEL模型、SHETRAN模型、SWAT模型、DHSVM模型等。

流域土壤侵蚀定量研究从20世纪20年代开始, 但直到60年代, 此类研究基本上仍是经验性的, 60年代末, 才有基于侵蚀过程原理的物理模型出现。1959年, Wischmeier和Smith第一次提出了通用土壤流失方程USLE^[7]。1978年美

* 收稿日期: 2005-07-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2003CB716807)

作者简介: 姚长青(1974-), 男, 安徽巢湖人, 在读博士, 主要从事水文模型、流域管理信息系统、地理信息系统开发与应用等研究。

国土壤保持局又推出了USLE的修订版RUSLE,对USLE进行了重大的改进^[8]。USLE和RUSLE具有较强的实用性,在世界范围内得到了广泛的应用^[9,10]。从80年代开始,国外一系列基于土壤侵蚀过程的物理模型相继出现,其中以美国的WEPP模型、欧洲的EUROSEM和荷兰的LISEM最具代表性。WEPP模型是目前国际上较为完整的流域土壤侵蚀预报模型,它几乎涉及与土壤侵蚀相关的所有过程,包括天气变化、降雨、截留、入渗、蒸发、灌溉、地表径流、地下径流、土壤分离、泥沙输移、植物生长、根系发育、根冠生物量比、植物残茬分解、农机的影响等^[11]。EUROSEM模型将侵蚀分为细沟间侵蚀和细沟侵蚀两部分,考虑了植被截流对下渗和降雨动能的影响,并考虑了土壤表层岩石碎块覆盖对下渗、流速和溅蚀的影响^[12]。LISEM模型也较详细地考虑了土壤侵蚀产沙的各个环节,能较好地模拟土壤侵蚀发生过程,且能与GIS完全集成,还可直接利用遥感数据^[13]。

从流域水文模型和土壤侵蚀模型的发展来看,越来越多的模型已经开始全面、综合地研究流域地理过程^[14],比如,SWRRB(Simulator for Water Resources in Rural Basins)模型已经是由198个数学方程造成的模型体系,SWAT(Soil & Water Assessment Tool)模型99版扩展为295个数学方程,而2001年7月推出的SWAT2000模型发展为由701个数学方程、1013个中间变量组成的庞大模型体系,通过这些方程和变量把诸如气候、气象、水文、地形、土壤、植被、人类经济活动等大多数地理因子与很多过程联系起来,模拟人类社会经济活动(土地利用、耕作方式、施肥、灌溉、化学农药使用)对自然环境的影响,可以模拟植被生长、生物量的转化等,这些内容已经远远超出单要素研究的范畴。近20多年来,大量的流域模拟模型涌现出来^[15],其中包括区域非点源流域环境影响模拟模型(ANSWERS)、农业非点源污染模型(AGNPS)等代表性的模型。随着计算机技术和空间信息技术的发展,从多学科的角度研究流域地理过程,模拟不同时空尺度上流域地理过程成为流域模拟模型的发展趋势。

2 流域模拟模型与GIS集成方法

目前一般从数据集成与功能集成两个方面研究模型与GIS的集成问题^[16~18]。众多的学者分别从数据集成、功能集成和两者结合的角度对环境模型与GIS集成方法进行了分类^[19~23]。流域模拟模型与GIS集成可分外连式集成和嵌入式集成两大类。外连式集成按其连接方式不同可分为互连式和共连式两种方法;嵌入式集成按嵌入方式不同可分为流域模拟模型嵌入GIS平台和GIS功能嵌入流域模拟模型两种方法。

2.1 互连式集成方式

互连式是指通过各组分提供的数据输入/输出接口,通过共享数据库或数据文件交换的方式进行连接(图1)。这种方式可充分利用已有的流域模拟模型,并可利用现有GIS软件(如ArcGIS、GRASS、ArcView等)的数据分析、管理和可视化功能,同时又便于用高级语言开发新的流域模拟模型,是目前常用的集成方式。这种方式比较容易实现;不需要大量冗余的编程过程,但在不同的软件之间进行数据交换十分复杂,容易出现错误;时间和空间效率均不高。

2.2 共连式集成方式

共连式是构造一公共用户界面使各组分通过与这一公共用户界面的连接而集成到一块(图2),采用这种连接方式集成的例子很多,ERDAS图像处理系统、GRASSLAND地理信

息系统以及ESRI公司的ArcView 3.2模型构造器都是采用共连式的系统集成方法。美国陆军工程军团也使用公共用户界面的外连式结构集成了一些成熟的流域模拟模型,开发出一套模拟建模系统。这些系统包括地下水模拟系统(GMS)、地表水模拟系统(SMS)和流域模拟系统(WMS),它们使用公共用户界面,将数量不断增长的模拟模型协调起来。这种方法只对已有模型作很少的、必要的改动,以保留它们被公认的特性。其优点是可以汲取那些已有的、被公认的流域模拟模型的精华,尽量减少修改原模型所带来的开销。缺点主要有两个:第一,原模型并不是为相互协同工作而设计的,它们使用不同的数据定义,不同的时间和空间分割方法。第二,将那些仍在开发中的模型纳入集成环境就意味着不得已而采用了模型的某一特定版本。当系统的输入要求或输出格式有所变化时,集成人员都需要根据新版本再次做必要的调整,而维护工作的挑战不仅耗时且不一定能够完成^[24]。

2.3 流域模拟模型嵌入GIS集成方式

目前越来越多的流域模拟模型被嵌入到GIS平台中(图3),用户直接利用GIS平台的同时可进行流域模拟研究。如嵌入无版权限制地理信息系统软件GRASS中的模型就包括AGNPS、ANSWERS、GASC2D、GLEAMS、SWAT、RZWQM、WEPP、MODFLOW、SIMWE, ArcView中也嵌入了WEPP、HSPE和面向流域管理的BASINS等流域模拟模型; ArcGIS中则嵌入了ARCStorm和ArcHydro、地下水Darcy水流模型和污染运移模型等^[24]。这种集成方式的不足之处是建模能力相对简单,模型的检验和校准工作常常需要与其他软件同时进行。

2.4 GIS功能嵌入流域模拟模型集成方式

众多的学者在建立流域模拟模型的同时开发了部分GIS功能作为模型的一部分(图4),给流域模拟研究以最大的自由空间,执行起来不受任何GIS数据结构的限制,灵活性大,可根据实际需要定义数据结构。例如, TOPMODEL, MIKESHE, MIKEBASIN, RiverCAD, HEC ~ RAS2.0, RiverTools和MODFLOW等都采用了可视化数据输入处理和模拟结果表达,大大提高了模型识别、验证与应用的效率。不足之处在于:一方面流域模拟模型软件包中的数据分析管理和可视化功能不及商业GIS软件,其空间数据处理分析功能有限,还需要借助其他GIS工具软件实现大规模数据的输入和前处理;此外,需要大量的底层程序设计和开发,任务繁重。

总之,外连式集成费用低,开发方式灵活,利于维护,但融合度稍差;嵌入式集成融合度好,效率高,但不利于GIS应用人员来开发。每种集成方法各有优缺点,具体选用哪一种方法来集成必须依据集成问题及所具备的条件等因素来权衡确定。

3 流域模拟模型与GIS集成存在的问题

流域模拟模型是以地学为主的多学科交叉研究领域,发展历史并不长,近10年才取得比较大的进展,是一个新的研究领域。从目前的进展来看,流域模拟注重地理过程的机理研究,注重多种地理过程的综合研究,尤其注重和GIS技术的集成研究。GIS与流域模型的集成研究一直是近年来最为活跃的研究领域之一,集成从最简单的互连式到嵌入式集成,越来越多的流域模拟模型都和GIS进行了多种方式的集成。但流域模拟模型和GIS技术的集成研究仍处在探索、试验和发展阶段,当前由于在数据、GIS技术、流域模拟模型和研究等方面存在的许多问题,使得流域模拟模型与GIS

的集成非常复杂和困难^[1, 10, 12, 25]。

3.1 数据问题

在流域模拟模型与 GIS 集成中, 数据集成是主要方向^[26]。但目前大多数 GIS 数据库中数据的精度和质量不可知, 元数据信息缺乏, 大大限制了流域模拟结果的精度和可

靠性; 流域模拟模型和 GIS 之间缺乏标准的通用数据接口, 有的数据接口文件的设计过于膨杂而缺通用性, 相互的转换难以实现, 影响了数据的可用性。当然, GIS 数据的缺乏, GIS 数据的时间和空间分辨率较低等都影响了流域模拟模型与 GIS 的集成效果。

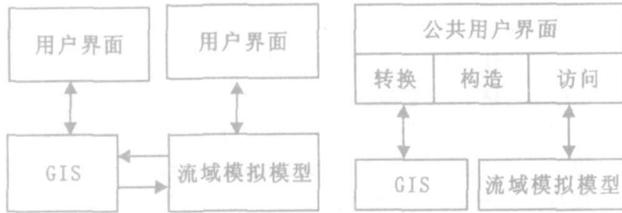


图 1 互连式集成方法 图 2 共连式集成方法 图 3 流域模拟模型嵌入 GIS 平台 图 4 GIS 功能嵌入流域模拟模型

3.2 GIS 技术问题

目前成熟的 GIS 系统还没有一个能有效管理时空四维数据, 而这种能力是流域模拟必不可少的。时间维对于流域模拟地理过程具有特别的意义, 这是由于流域的各个地理过程(如降水、入渗、蒸发、径流等)都是随时间变化的过程; 而真实的流域地理过程是在三维空间上进行的, 目前大多数 GIS 缺乏三维分析、模拟及可视化的有效手段, 缺乏模拟三维的流域地理过程。此外, 对于一般的用户, 各种 GIS 软件仍然太复杂, 不易掌握, 需要花费大量的时间去学习, 才能很好地使用 GIS 软件, 这为 GIS 与流域模拟模型集成增加了难度。

模型使许多敏感参数得不到控制。

4 研究展望

目前, 我国许多政府部门、大学和研究机构正在积极开展建设“数字黄河”、“数字长江”等, 纷纷提出建立数字流域的设想和框架, “数字黄河”与“数字长江”也提上日程^[27-29]。数字流域是综合运用“5S”、数据库技术、网络技术、多媒体及虚拟现实等现代信息技术对全流域的自然、社会和经济等各种信息进行数字化采集与存储, 动态监测与处理、深度融合与挖掘, 综合管理与发布^[27]。其建设为流域模拟模型和 GIS 集成提供一种全新的模式, 从根本上解决目前流域模拟模型和 GIS 集成的众多问题, 实现流域模拟模型和 GIS 的“无缝”集成。基于数字流域的综合集成方式是流域模拟模型与 GIS 集成研究的方向之一, 其优越性主要表现在:

3.3 流域模拟模型问题

流域模拟建模理论本身还不成熟, 还处于不断发展中, 流域模拟模型缺乏权威的、全面的模型规范, 以及过于专业化的算法阻碍了与 GIS 的集成; 流域模拟模型通常都是独立于 GIS 开发出来的, 它所要求的数据存储形式以及内部数据结构一般都不为 GIS 所接受, 很难直接有效地把模型纳入到 GIS 中; 而且流域模拟模型的技术水平不足, 无法满足如流域模拟从小尺度到大尺度转化等问题^[3]。

(1) 流域模拟模型与 GIS 的集成是基于数字流域构建的, 所有的流域要素(如集水面积、河长、坡度等)皆由 DTM/DEM 自动生成, 无需手工操作, 大大提高了工作效率^[30]; 同时覆盖整个流域空间的、多重时间的和空间尺度的、多要素的数字信息为流域模拟模型与 GIS 的“无缝”集成提供了数据保障。

3.4 研究人员问题

GIS 开发者和流域模拟模型研究人员缺乏协作, 对 GIS 空间分析功能的需求认识不一。流域模拟模型开发人员缺乏对 GIS 功能和缺陷的充分认识, 很少利用 GIS 的空间分析能力进行模型的构造; 模型的实现人员一般为非专业软件程序员, 只注重物理模型的实现, 而不关心软件代码的规范化, 在模型代码中, 模型的基本假定与方法说明并未作为模型的一个有机成份, 不利于用户对模型的选择与使用。此外, 在不熟悉流域模拟模型优缺点的 GIS 用户操作下, 复杂的流域模拟

(2) 基于数字流域的综合集成模式下, 遥感遥测技术的应用, 使得高分辨率实时的流域信息与流域模拟模型进行最佳集成, 解决由于实时数据不足等引起的流域模拟模型预报的精度及预见期长度等问题。

(3) 数字流域建设的一个重要方面就是真实流域及其时空变化在虚拟三维空间的数字化重现和可视^[31], 这就为流域模拟模型模拟、可视化三维的流域地理过程提供了平台, 弥补了 GIS 在这三维分析、可视化功能上的缺陷。

参考文献:

[1] 李硕, 曾志远, 张运生. 环境模拟和 GIS 集成的初步研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 134- 141.

[2] V P Singh. 水文系统: 流域模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.

[3] 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.

[4] Abbott, M B, J C Bathurst, J A Cunge, et al. An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE" I: history and philosophy of a physically based distributed modelling system [J]. Journal of hydrology, 1986a, 87: 45- 59.

[5] 郭生练, 李兰, 李汀芳, 等. 分布式流域水文物理模型的研究现状与进展[A]. 见: 刘昌明, 陈效国. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.

[6] 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341- 348.

[7] Wischmeier, W H, Smith, D D. Rainfall Energy And Its Relationship to Soil Loss[J]. Trans. Am. Geophys. Union, 1958, 39: 285- 291.

[8] Wischmeier, W H, Smith, D D. Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide To Conservation Planning [M].

Washington D. C.: U. S. Department of Agriculture, 1978.

- [9] 史培军, 刘宝元, 张科利, 等. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. 资源科学, 1999, 21(5): 9- 18.
- [10] 白清俊. 流域土壤侵蚀预报模型的回顾与展望[J]. 人民黄河, 1999, 21(4): 18- 21.
- [11] Laflen J M, Lwonald J, Foster G R. WEPP: A New Generation of Erosion Prediction Technology[J]. J. of Soil and Water Cons, 1991, 46(1): 34- 38.
- [12] Morgon, R P C, J N Quintonand, R J Rickson. EUROSEM Documentation Manual[S]. Version 1. Silsoe College, Silsoe, 1992.
- [13] De Roo A, Wesseling C G, Ritsma C G. LISEM: A Single Event Physical Based Hydrological and Soils Erosion Model for Drainage Basins I: Theory, Input and Output[J]. Hydrological Processes, 1996, 10: 1107- 1117.
- [14] 曾志远. 流域计算机模拟——自然地理过程的高度量化研究[A]. 见: 中国地理学会. 地理学的理论与实践 [C]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [15] Fred L Ogden, Jurgen Garbrecht, Paul A Debarry, et al. GIS and Distributed Watershed Models. II: Modules, Interfaces, and Models[J]. J. of Hydrologic Engineering, 2001: November/December, 515- 523.
- [16] 张犁. GIS 系统集成的理论与实践[J]. 地理学报, 1996, 51(4): 306- 313.
- [17] 薛安, 倪晋仁, 马蔼乃. 模型与GIS集成理论初步研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 134- 142.
- [18] Nyerges, T L. Understanding the scope of GIS: Its relationship to environmental modeling [A]. In: Environmental modeling with GIS [C]. Edited by Goodchild, M F, Park, B O, Steyaert, L T. NY: Oxford University Press, 1993.
- [19] 赵伟, 林报嘉, 邬伦. GIS与大气环境模型集成研究与实践[J]. 环境科学与技术, 2003, 26(5): 27- 29.
- [20] 张行南, 耿庆斋, 逢勇. 水质模型与地理信息系统的集成研究[J]. 水利学报, 2004, (1): 90- 94.
- [21] 朱雪芹, 潘世兵, 张建立. 流域水文模型和GIS集成技术研究现状与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 10- 13.
- [22] 万洪涛, 周成虎, 万庆, 等. 地理信息系统与水文模型集成研究述评[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 560- 566.
- [23] 赵士鹏. 山洪灾害评估的系统集成方法研究[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1997.
- [24] James Westervelt. 流域管理的模拟建模[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004.
- [25] A K Bergt, A K Skidmore, G Nieuwenhuis. Environmental Modelling: Issues and Discussion[A]. In: Environmental Modelling With GIS and Remote Sensing[C]. Edited by Andrew Skidmore. Great Britain: Biddles Ltd. Guildford and King's Lynn, 2003.
- [26] Jurgen Garbrecht, Fred L Ogden, Paul A Debarry, et al. GIS and Distributed Watershed Models. I: Data Coverages and Sources[J]. J. of Hydrologic Engineering, 2001: November/December, 506- 514.
- [27] 张秋文, 张勇传, 王乘, 等. 数字流域整体构架及实现策略[J]. 水电能源科学, 2001, 19(3): 4- 7.
- [28] 崔伟宏, 牛振国, 符海芳. “数字黄河”科学工程框架研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(4): 37- 41.
- [29] 承继成, 林琿, 周成虎, 等. 数字地球导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [30] 任立良. 流域数字水文模型研究[J]. 河海大学学报, 2000, (4): 1- 7.
- [31] 袁艳斌, 徐学军, 张勇传, 等. 数字流域建设中空间与非空间信息的融合[J]. 水电能源科学, 2002, 20(3): 54- 57.

(上接第24页)

(4) 经过GGR6号处理的1年生苗高、地径平均值均比对照有较大提高。其中, 处理1苗高、地径生长量分别比对照提高了66.4%和71.9%, 处理2的苗高、地径生长量分别是对照的151.9%和159.9%, 方差分析表明, 2种处理间苗高、地径差异极显著, 2种处理与对照的苗高、地径也达极显著差异。

(5) GGR处理对1年生油松容器苗根系发育也有较大影响, 主要表现在根系总长度增加47%~51%、主根长度增加

24%~35%、侧根数量增多16%~26%、须根和毛根数量显著增多。除侧根数外, 均为处理1大于处理2。

(6) 在苗木鲜重上, 处理1地上、地下部鲜重分别是对照的2.3倍和3.2倍; 处理2地上、地下部鲜重分别是对照的2倍和3倍。

(7) 我国北方地区油松造林一般采用2年生壮苗, 其一级苗标准为苗高大于20cm, 地径大于2cm, 因此GGR处理经济效益等应用效果有待以后进行。

参考文献:

- [1] 朴荣忱, 孟新龙, 李长荣. 三十烷醇在育苗上的应用[J]. 林业科技通讯, 1984, (7): 10- 12.
- [2] 张连第, 阎德仁, 刘永军, 等. 稀土浸种对油松种子活力及其物质代谢的影响[J]. 林业科技通讯, 1991, (5): 17- 19.
- [3] 金佩华, 张金荣, 卢爱英, 等. 绿色植物生长调节剂和M-3试剂在油松育苗上的应用及作用机理研究[A]. 王涛, 陶章安. 绿色植物生长调节剂应用技术论文集(3)[C]. 北京: 科学技术出版社, 1999. 511- 519.
- [4] 郭明建, 李志强. 生根粉ABT6号在侧柏和落叶松播种育苗上的应用[A]. 王涛, 陶章安. 绿色植物生长调节剂应用技术论文集(3)[C]. 北京: 科学技术出版社, 1999. 522- 523.
- [5] 孙志强. ABT生根粉在飞播治沙造林种子处理中的应用[J]. 陕西林业科技, 1997, (4): 8.
- [6] 薛崇伯. 林木采种育苗手册[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1987.