

地理信息系统在流域生态水文过程模拟研究中的应用

夏佰成¹, 胡金明¹, 宋新山²

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 200051)

摘 要: 生态水文学是研究生态格局和生态过程变化水文学机制的科学。该学科的一个重要研究方向是探讨不同时空尺度上和一系列环境条件下的生态水文过程, 包括生态水文物理过程、生态水文化学过程及其生态效应。这必然要求建立相关生态水文模型。生态水文过程影响因素众多, 而且具有明显时间和空间变异性, 需要多时相、多信息源的历史动态变化信息以及多方法和多学科的综合。目前, GIS 在信息的动态获取、分析处理、可视化以及二次开发等方面的技术和方法取得了长足的进步, 为实现生态水文过程研究提供了有力支持。

关键词: 生态水文过程; 模拟; GIS; 流域

中图分类号: TP79; P331

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)01-0005-04

Applications of GIS in the Simulation of Eco-hydrological Process Research in the Watershed Scale

XIA Bai-cheng¹, HU Jin-ming¹, SONG Xin-shan²;

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China;

2. College of Environment Science & Engineering, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: Ecohydrology studies hydrological mechanisms in ecological pattern change and ecological processes change. It mainly discusses eco-hydrological process, including physical process, chemical process and ecological effects under different spatial and temporal conditions, so it is quite important to develop relevant eco-hydrological models. Due to eco-hydrological process, affected by a great amount of parameters, is of temporal and spatial varieties, it requires multi-temporal and multi-source data about the changes eco-hydrological processes, and different methods and disciplines. Now, GIS has made great progress in the technology and methodology in dynamic obtainment, procession, visualization of data, etc., which will greatly help the research on eco-hydrological processes.

Key words: eco-hydrological process; simulation; GIS; watershed

进入 20 世纪 70 年代以来, 世界人口快速增长, 全球变化背景下的土地利用/土地覆被变化对局地、区域以及全球气候都产生了广泛而深刻的影响。世界范围内, 由于土地覆盖变化引起的土壤损失和退化以及沉积物运移无疑已经极大的增加了^[1]。同时, 全球性的淡水资源危机日益突现, 而且愈演愈烈。旱涝灾害频繁, 水污染问题突出, 水土流失现象严重, 使本就脆弱的生态环境不断恶化。而传统的基于“需求管理”的水资源管理模式和基于水文机制的工程措施以及末端污染物的被动处理、简单的植树种草以及降低坡度等措施已经不能应对当前全球性的淡水资源危机, 都无法解决这一难题。在此背景下, 需要一种新的科学范式, 生态水文学就是在这种背景下, 随着生态学和水文学的交叉耦合以及 UNESCO 的 MAB 和 IHP 等大型研究计划推动下逐渐产生和发展起来的^[1, 2]。

从事生态水文学的研究者认为, 近百年来, 人类非理性活动破坏了流域和谐的生态水文情势, 导致水环境系统发生紊乱。Carpenter, S. R. 指出流域的改变和利用以及人类造成的水产资源的污染对淡水生态系统造成最严重的压力^[3]。

不同时空尺度上和一系列环境条件下的生态水文过程研究是生态水文学的一个重要研究方向, 也是 MAB 和 IHP 等研究计划的主要内容之一^[1]。从生态水文过程对物质的运移和转化作用着手, 研究其发生发展规律, 调整人类活动, 与自然为善, 对流域的生态水文过程进行合理修复和改进, 以使水环境系统沿着持续发展途径演化。从水分行为的角度来说, 生态水文过程研究包括生态水文物理过程、生态水文化学过程及其生态效应^[4]。生态水文物理过程主要是指植被覆盖和土地利用对降雨、径流、蒸发等水分要素的影响; 生态水文化学过程是指水质性研究; 而水分生态效应主要指水分行

收稿日期: 2003-11-12

基金项目: 中科院知识创新重要方向项目(KZCX2-SW-320-2); 中澳国际合作项目(ACIARPROJECT LWRR1/1998/130)

作者简介: 夏佰成(1978-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事遥感和地理信息系统应用研究。

为对植被生长和分布的影响。

在传统的集总性概念模型和水动力学模型的基础上,考虑区域/流域各种环境要素的空间分异,具有一定物理基础的分布式模型是生态水文过程研究的重要手段,也是目前环境模型发展的趋势。然而生态水文过程本身的复杂性、随机性以及影响要素的多样性增加了研究的复杂性,导致生态水文过程难于直接量化;而且生态水文过程模拟要求利用多源多类型信息,使得生态过程研究较为困难。GIS 具备了强大的获取和管理多源空间信息的能力,可以方便的建立数据库,进行研究区域离散以及各种信息的深层次挖掘以提取所需要的各种信息;组件 GIS 使生态水文过程模型的研制或 GIS 与生态水文模型的整合非常方便。这使得 GIS 可以在生态水文研究中能发挥重要作用。Maidment 等人认为 RS&GIS 是流域模型从集总式到分布式转化的桥梁。下面分述当前 GIS 在生态水文过程研究中的应用。

1 数据的获取和管理

1.1 数据获取

生态水文过程研究横跨生态学和 hydrology,属于交叉学科,生态水文过程随机性强,影响因素众多,相互作用极其复杂,而且影响要素具有明显的时空分布不均匀性和变异性,使生态水文变化难于直接量化;而且生态水文过程模拟需要包括传统的点状分布的水文气象实测数据、实验数据等数据,以及各种专题信息如地质地貌、植被、土壤、土地利用状况、水体(河流、湖泊等)的分布、居民地分布、水文监测站和气象站的位置和分布等多源、多类型、多时相信息。传统是利用点状分布的实测数据,观测点密度和观测时间有限,是水文模型研究停滞的重要原因。新型数据获取技术如遥感和地理信息系统技术的发展为生态水文模型的开发和应用提供必要数据支持。

遥感技术在水资源和生态学领域都是重要的信息源,可以直接或间接得到土地利用、植被指数、叶面积指数等下垫面信息,也可以获得研究区域包括缺少监测点区域的降水、蒸发、土壤水、水质等多种水文信息^[6]。而且可以利用模型外延到更大区域。研究人员最初根据遥感信息和地面同步实测资料建立回归模型,如可勒丁(Creutin)^[7]等用克里格插值方法把地面降雨资料与卫星遥感资料结合起来估算中东的面雨量,近年来开始将遥感信息直接作为生态水文模拟模型的参数输入,和 GIS 结合获取流域生态水文模型的数据和率定有关参数。徐雨清^[8]等应用 GIS 提取流域边界、地形、流路等信息,应用 NOAA-AVHRR 卫星数据获取植被和土地利用状况,建立了流域多年平均径流量与降雨量、植被等要素间的关系模型。王腊春^[9]等根据 SCS 模型,通过遥感资料区确定 CN 值,从而确定流域最大可能土壤蓄水量 S。

遥感技术向高光谱、多时态、多源数据发展,如 NOAA 系列、MODIS 系列、Landsats 系列、SPOT 系列、日本静止气象卫星以及微波传感器等可以提供多光谱、多时态、多空间分辨率的数据,因此海量遥感数据的快速高效问题亟待解决。GIS 可以辅助遥感图像处理,建立专家解译知识库,以提高遥感解译的速度和精度,为生态水文学研究提供充分数据支持。

1.2 海量信息的高效管理

GIS 和遥感结合可以提供大量的常规方法无法得到的

信息,这些信息对于流域尤其是大流域会是海量的。但一般生态水文模型的数据管理功能相对较弱。GIS 在多源空间数据以及非空间数据的获取、存储以及管理方面的功能已趋成熟,许多地理信息系统商业软件如 ARCGIS 可以和大型商业数据库如 ORACLE 镶嵌,能充分发挥大型数据库的空间数据管理功能。利用 GIS 可将遥感、专题图件、传统实测实验数据等多种数据源统一,使数据具有统一的格式、坐标、投影、比例尺等,方便的建立数据库,通过各种数据模型和数据结构将多源、大量的生态水文数据统一管理,复杂的检索并提取所需要的各种信息,为生态水文过程模型提供基本数据源,能够方便地实现数据共享,为模型的进一步模拟单元划分以及参数化提供支持。

然而,生态水文过程非常复杂,涉及要素很多,数据融合和尺度问题是亟待解决的难点之一。而 GIS 在数据的无缝集成、尺度等方便的研究比较薄弱,GIS 和 RS 的结合也不成熟,而且生态水文数据尤其是水文数据采集各部门各行其是,共享程度很差,目前利用基于 GIS 建立的流域数据库多是水文数据、专题图的管理,并不能为生态水文模拟和流域决策提供充足的数据支持。

2 信息的处理和挖掘:单元的划分、参数化以及信息的推求:DEM 信息提取过程图

模型是自然规律研究的必然结果和要求。生态水文过程模拟必然要求建立相应的模型,但生态水文学是个年轻的学科,生态水文研究也处于初步阶段,因此目前生态水文研究多借鉴生态学、水文学以及其它学科的模式。广义的讲,生态水文模型就是任何可以用于生态水文研究的模型,狭义的讲,在模型构建中考虑生态——水文过程的一类模型就是生态水文模型^[5]。许多模型如 LASCAM、SHE、SWAT、SWM 等可以模拟径流、洪水以及营养物质的运移和分布,另外还考虑研究区域的生态属性,以 LANDVI 土地利用等作为输入数据,模拟土地利用等对水文的影响,可以用于生态水文过程研究。

流域降水是分散地降落在流域下垫面上,各点产生的径流流至统一出口断面,它具有分散性输入和集中性输出的特点。目前流域模型普遍被分为集总式模型(Lumped model)和分布式模型(Distributed model)两种类型。集总式参数模型没有考虑流域内部各地理因素的空间变化,一般采用优势、均值等方法来处理非线性自然过程,具有明显的缺陷。分布式参数模型考虑了自然过程及其影响因素的分布性,将区域或流域分成一些有一定的拓扑关系研究单元,假设这些单元内部是均一的,采用有限差、有限元等数值方法求解,具有较强的物理基础,是生态水文过程模拟模型的发展方向。

现有的生态水文学可借鉴的分布式模型几乎都采用划分单元面积的方法,在该单元面积上采用集中输入和集中输出,最后将各单元现行叠加程出口断面的流量,模型的求解往往采用有限差分、有限元等数值解法,求解时也将研究区划分为网格。这种处理方法是合理的,如果单元划分不合理,各单元雨量的空间变化、参数、产流机制就有很大的不同。因此单元的划分和单元赋值是生态水文过程模拟非常重要的一环。

研究单元的划分有多种类型,可以是格网(grid)、子流

域(subcatchment)、坡面(hillslope)、水文响应单元(hru), 群体相应单元(gru)、聚合模拟单元(asa)等^[10], 这些离散方法与地理信息系统栅格数据结构(grid)和不规则三角网(tin)非常相似, 利用地理信息系统的网格自动生成算法可以方便的进行格网划分^[11], 使研究区域更好的离散。最典型的莫过于基于DEM 流域离散和特征提取, 算法多样, 可以方便准确的提取流域子流域、河流、河网密度、流路等多种特征^[12], 任立良等^[13, 14]采用M artz 和 Garbrecht 研制的数字高程流域水系模型(DEDNM) 由栅格型DEM 自动生成流域分水线, 并对河网与子流域进行编码, 构件和网结构拓扑关系, 并结合新安江模型建立数字水文模型; 王建群^[15]等将研究区划分为正方形网格, 模拟土地利用变化对水文的影响; 沈晓东^[16]基于栅格数据格式实现了坡面的产汇流模拟, 能够获取流域上任意时刻任意栅格的径流量。

不同方法、不同尺度的离散单元是模型构建的基础, 模型的输入数据从离散单元的土壤水、降水、蒸发等属性得到, 以实现多种环境因素和环境过程之间的定量联系。大多数栅格地理信息系统具有强大的空间分析功能, 包括多要素的叠加分析、缓冲区分析、网络分析、地形分析等功能^[17], 能够基于现有的信息数据基础进行深层次的信息挖掘, 对各离散单元的参数进行详尽的描述, 甚至可以对无资料地区进行模拟^[18], 从而提高生态学和水文学的综合(integration)研究的精度和效率; 与元胞自动机、马尔可夫矩阵等模型结合可以预测未来土地利用、城市化变化趋势, 将所得结果输入模型, 以预测未来土地利用方式下流域水文情势变化; 径流、蒸发等实测数据是模拟的调参和模型校正的主要数据源, 也是流域模拟精度的主要手段。但实测数据多为点状数据, 地理信息系统包括了反距离权重(DW)、克里格(KR NGNG)、SP NG、最邻近法、双线性内插、双三次褶积等多种内插法, 可以方便得到流域各离散单元的数据。

3 水文模型的管理以及GIS 与生态水文模型的整合

3.1 水文模型的管理

生态学、水文学等相关研究的深入和计算机技术的发展, 推动了模型的开发和应用, 出现了大量计算方法和软件, 如SHE 模型、LASCAM 模型、USGS 降雨径流模型、SLURP 模型、TOPMODEL 模型、TOPAZ 模型、SWAT 模型、SWAT 模型等。

生态水文过程本身极其复杂, 不仅要模拟水动力过程, 还要描述各类物理化学物质在区域或水体中的运移转化, 研究生态过程的水文学机制, 涉及到许多物理、化学和生物过程, 而且生态水文过程具有明显的区域性, 影响因素多样, 相互作用机理复杂, 必然导致模型大都比较复杂。而且, 环境模型软件一般由不同研究部门和研究人员开发, 软硬件环境、开发语言、数据结构、数据格式、模型功能、模型的精度彼此差异很大, 对环境过程模拟预测的详细程度各异, 导致模型的相互连接、结果对比非常不便, 造成应用中模型选择和应用十分困难, 有时某项工作或研究甚至不同的阶段需要多个模型, 就需要重复输入许多数据和数据格式的频繁转化, 不仅增加额外的工作量, 降低工作效率, 而且数据重复输入和多次转化会产生误差, 影响计算成果的精度。因此, 如何管理

和使用生态水文模型成为一个亟待解决的问题。李本纲^[19]等在广泛分析各类水环境模型的基础上, 探讨建立水环境模型库的原则和方法, 并提出了水环境模型库管理系统的基本结构, 认为在GIS 的支持下可从地表水模型、地下水模型、非点源模型中分别抽取能决定模型适用范围、复杂程度的若干技术参数, 并用这些参数组建模型关系数据库, 利用GIS 的SQL 语句按照这些技术参数查询、检索和选择所需的水环境模型, 可以实现模型的管理。

3.2 GIS 与生态水文模型的整合

环境模型库的建立方便了模型的选择, 但环境模型大都用FORTRAN 或C 语言等底层语言开发, 采用MSDOS 界面, 学习和操作难度较大, 模拟结果表达功能较弱。如澳大利亚LASCAM 模型需要结合MATLAB 结合制作各种图表^[20]。地理信息系统的可视化功能很强, 可以方便的进行数据的输入、模拟结果的表达输出, 将研究人员从单调枯燥的数据分析中解脱出来, 生态水文模型的设计、校验、修改和应用以及模型之间的相互比较也变得相对容易。另外, 现有GIS 在解决社会、资源、环境问题中功能源不足, 缺乏建设性、探索性数据分析功能以及建模模拟缺失是当前GIS 系统的致命缺陷, 影响了GIS 的应用广度和深度。将环境模型和GIS 集成可以弥补GIS 之一缺陷。正由于GIS 与环境模型在功能上的互补性, 两者的结合近年来一直是环境研究中颇受重视的领域。

GIS 与模型的集成有很多分类, 李硕等^[21]综合国内外研究成果, 根据GIS 与模型集成的程度将GIS 与环境模型的集成方式分为四类: 独立应用、松散集成、紧密集成和完全集成。这4 种方式集成程度越来越高, 编程要求也越来越高。独立应用集成方式集成程度最低, 实质是GIS 和环境模型分别使用, 数据交换通过ASCII 文件进行, 集成效果有限; 集成程度最高的是完全集成, GIS 与环境模型为同一系统的模块, 数据模型一致, 但开发难度极大。因此松散集成和紧密集成是最常见的集成方式, 有的水文模型引入GIS 的空间分析功能如美国农业部农业研究实验室开发的TOPAZ 软件, 和RSI公司的RIVERTOOLS; 有的GIS 将水文模型作为自身的一个模块进行开发。成功实例如AGNPS Arc/info (Agricultural Non Point Source)、SWAT ARCVIEW - AVSWAT2000^[22] ANSWERS GRASS (A ruak Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation) 等, 它们将GIS 和水文、水土侵蚀等模块结合, 建立了分布式模型, 研究流域、区域的水文过程, 同时它们也考虑流域或区域的生态属性, 将叶面积指数、植被指数、土地利用类型等作为输入, 建立生态和水文之间的联系, 研究生态变化的水文效应, 成为宏观尺度的生态水文过程研究的有利的工具。越来越多的商业地理信息系统软件提供了二次开发语言, 如宏语言AML、AVENUE、MAPBASIC 等, ESRI 公司的ARCOBJECTS 和MAPOBJECTS 控件使开发者可以用VB、VC 等通用编程语言方便的进行二次开发, 促进GIS 与模型的整合。

但是两者的整合并非纯技术问题, 只通过编程就能实现, 两者的整合需要坚实的理论基础。首先, 从技术的角度看, 几乎在所有的水文模型中, 水文过程的时间变化比水文现象的空间变化更为重要。在当前的GIS 中, 水文现象的时

间变化仅作为空间环境结果来进行模拟。为更好的与环境模型相结合,需要建立具有时间维的四维 GIS。而目前时态 GIS 研究处于初级阶段,虚拟 GIS 存在画面单调,运行速度慢等问题,GIS 功能仍需完善。其次,目前现有流域水文模型大都是概念性模型,许多结构环节上主要借助于概念性元素模拟或经验函数关系描述,只涉及现象的表面,参数缺乏明确的物理意义,只能主要依据实测降雨和径流资料利用最优化方法来反求,而这样求得的模型参数必然带有经验统计性,只能反映模拟值与实测值拟合程度,反映有关影响因素对流域径流形成过程的平均作用。再次,GIS 和模型的整合尽管有很多优点,并不能代表模型本身的高质量^[23],GIS 和模型的整合并不能从根本上提高模拟精度,而且,友好的用户界面和良好的可视化效果会导致不熟悉水文规律的用户草率地对一个非常复杂的水文模型进行操作,并随意改动水文参数,从而得到不合理的模拟结果而不了解造成这些结果的原因。D. Z. Sui 等^[24]认为目前 GIS 和水模型的结合本质是由技术驱动,而没有解决整合中的理论概念问题;不应该把 GIS 简单的看成一种数据管理工具,否则不会是真正的整合,只是简单的一块使用,旧瓶装新酒罢了。目前,生态水文模型和 GIS、RS 的耦合上多限于低层次文件交换,且仅限于具体工作中,只是一种数据共享的初级耦合,一体化式耦

参考文献:

合模型的建立尚需时日。

4 结 论

目前,GIS 在信息获取、管理、分析等发挥了重大作用;但目前地理信息系统缺乏分析模型已成共识,和水文模型模型的整合可以促进地理信息系统空间模拟模型、尺度转换、数据整合等方面的基础研究,使地理信息系统理论和功能更趋完善;分布、半分布式模型是生态水文过程模拟研究的必然趋势,地理信息系统为数据库建立、模型选择以及研制提供有力支持;组件地理信息系统(COM GIS)使模型的开发相对容易,虚拟 GIS 研究的深入使流域生态水文过程模拟结果更为直观。

尽管如此,生态水文模型和 GIS 的结合并不代表模型本身的高质量,模型的开发需要 GIS 理论、技术的进一步完善和生态水文过程研究的深入,两者的整合不应该仅仅是技术或数据层面上的整合,而应该是具有坚实理论基础高层次的整合,进而构建流域决策支持系统(DSS)可以衡量人类活动对区域水文、生态环境的影响,预测国家水资源管理、退耕还林等政策对流域生态环境的影响,可成为决策的有力工具。

- [1] Janauer G A. Ecohydrology: fusing concepts and scales[J]. Ecology, 2000, 16(1): 9- 16
- [2] 严登华,何岩,邓伟,等. 生态水文学研究进展[J]. 地理科学, 2001, 21(5): 467- 473
- [3] Carpenter S R, S G Fisher, N B Grimm. Global change and freshwater ecosystems[J]. Annu. Rev. of Eco. Syst., 1993, 23: 119- 140
- [4] 黄奕龙,傅伯杰,陈立顶. 生态水文过程进展[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 580- 587
- [5] 王根绪,钱鞠,程国栋. 生态水文科学研究的现状和展望[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 314- 323
- [6] 毕中兴,中北理. 遥感和地理信息系统与水文学整合研究进展[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 45- 49
- [7] Cretin, J D, G Delrieu, T Lelel. Rain measurement by raingage- radar combination: a geostatistical approach[J]. J. Atmosphere Ocean Tech., 1988, 5(1): 102- 115
- [8] 徐雨清,王兮之. 遥感和地理信息系统在半干旱地区降雨——径流关系模拟中的应用[J]. 遥感技术和应用, 2000, 15(1): 28- 31
- [9] 王腊春,熊江波. 用遥感资料建立分块产流模型[J]. 地理科学, 1997, (2): 76- 80
- [10] 万洪涛,周成虎,万庆,等. 地理信息系统雨水文模型集成研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 560- 568
- [11] 马千程,阎国年,施毅. GIS 支持下计算格网自动生成技术[J]. 水科学进展, 1999, 10(1): 37- 41
- [12] 李丽,郝振纯. 基于 DEM 的流域特征提取综述[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 251- 256
- [13] 任立良,刘新仁. 基于数字流域的水文过程模拟研究[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(4): 45- 52
- [14] 任立良,刘新仁. 基于 DEM 的水文物理过程模拟[J]. 地理研究, 2000, 19(4): 369- 376
- [15] 王建群,卢志华. 土地利用对水文系统的影响研究[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 292- 298
- [16] 沈晓东,王腊春,谢顺平. 居于栅格数据的流域降雨径流模型[J]. 地理学报, 1995, 50(3): 264- 271
- [17] Goodchild M F. The state of GIS for environmental problem-solving[A]. Goodchild M F. Environmental Modeling With GIS [C]. New York: Oxford University Press, 1993
- [18] 张建云,何惠. 应用地理信息进行无资料地区流域水文模拟研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(4): 345- 350
- [19] 李本纲,陶澍,曹军. 水环境模型和水环境模型库的管理[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 14- 20
- [20] Neil R, Viney, Murugesu Sivapalan. Modeling catchment processes in the Swan- Avon river basin[J]. Hydrol Process, 2001, 15: 2 671- 2 685
- [21] 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
- [22] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79- 86
- [23] 吴险峰,刘昌明. 流域水文模型的若干进展[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341- 348
- [24] D Z Sui, R C M Aggio. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1999, 23: 33- 51