第16卷 第1期 湖 泊 科 学 Vol.16, No.1
2004年3月 JOURNAL OF LAKE SCIENCES Mar., 2004

# 流域综合管理方法与技术*

李恒鹏 陈 雯 刘晓玫
(中国科学院南京地理与湖泊研究所，南京 210008)

提 要 流域作为一个具有明确边界的地理单元，流域以水为纽带，将上、中、下游组成一个普遍具有因果联系的复合生态系统，是实现资源和环境管理的最佳单元.流域综合管理已经被认为是实现资源利用和环境保护相协调的最佳途径. 然而，由于流域综合管理涉及多学科，多部门，内容非常广泛.近年的流域管理还主要停留在一个目标.本文在流域模拟管理研究及实践的相关经验基础上，系统地讨论了流域综合管理实施方法、关键技术以及主要技术问题.

关键词 流域综合管理 流域模拟 信息技术 复合生态系统
分类号 P941.77

长期以来，人们一直只重视资源利用，经济发展，而很少考虑资源和环境的保护，随着资源、环境问题的日渐突出，如人均耕地减少、自然资源退化、热带森林消失、水资源缺乏和全球变暖等，人类逐渐认识到资源开发利用应与环境保护相协调. 20 世纪 60 年代，水体污染、水质下降等水环境问题已经得到发达国家的重视. Rachel Carson 在《寂静的春天》一书中阐述了水质快速恶化的趋势以及工业污染物在这一过程中的突出作用. 此后，世界各国及研究机构一直致力于实现资源利用与环境保护相协调的发展策略，控制工业发展造成的点源污染[1]. 然而，在随后的 20 多年来，环境问题仍然没有得到很好的解决[2]，研究发现，流域水质除了和工业污染有关，还与农业生产造成的面源污染以及因湿地减少导致自然系统自净能力下降有关. 1992 年的环境与发展大会把环境问题作为一个重要议题，会议提出环境保护要以系统的、综合的观点，而不是从某一系统组分出发.会议最终形成以流域为单元进行综合开发和管理的思路. 目前，流域综合管理的观点已经被世界各国政府及学者广泛接受，但是因缺乏相应的实施方法致使流域综合管理停留在一个目标. 本文通过分析、总结已有的流域管理研究和实践经验，探讨流域综合管理的实施方法及技术问题，为流域综合管理的实施提供一些有益的见解.

## 1 流域综合管理实施方法

### 1.1 流域综合管理的概念

流域作为一个相对独立的自然-社会-经济复合系统，成为大气圈、岩石圈、陆地水圈、生物圈和人文圈相互作用的联结点，是各种人类活动和自然过程对环境影响的汇集地和综合反映. 以流域为单元进行管理能够使自然、社会和经济要素有机地结合起来，有利于协调环境保护和社会经济发展目标，实现区域的可持续发展. 流域综合管理就是以流域为管理单元，在政府、企业和公众等共同参与下，应用行政、市场、法律手段，对流域内资源全面实行协调的、有计划的、可持续的管理，促进流域公共福利最大化.

### 1.2 流域综合分析与管理方法

流域综合管理从流域复合生态系统中自然与人文的众多联系出发，分析和决策过程中考虑了众多目标，体现了生态、文化、社会和经济目标的综合和集成，被认为是实现可持续发展的最佳管理途径[3-6]. 然而因流域综合管理涉及众多部门和团体，分析和决策过程涉及众多学科，实施的目标又比较笼统，可操作性不强. 因此，如何对流域进行综合分析和管理策略成为研究的一个重点. 近年来，由美国环境保护署湿地、海洋和流域办公

* “973 计划”课题(2002CB412300)、中国科学院知识创新项目(CXNIGLAS-A02-013)项目和所长专项项目联合资助.
2003-06-08 收稿；2003-11-20 收修改稿. 李恒鹏，男，1973 年生，副研究员，博士；email：hpli@niglas.ac.cn.

室(The Environment Protection Agency's Office of Wetland, Ocean and Watershed, EPA's OWOW)与美国印第安环境办公室(American Indian Environment Office,AIEO)合作进行了关于发展流域综合分析与管理的联合项目,提出了流域综合管理实施的一套方法与步骤,并编成流域分析与管理实施的手册(Watershed Analysis and Management Guide for Tribes,WAM)[7]. 这一手册主要从流域问题出发,阐述了一套综合评估及决策的方法,体现了流域综合管理的思想,在流域综合管理实施中具有普遍适用的指导意义.

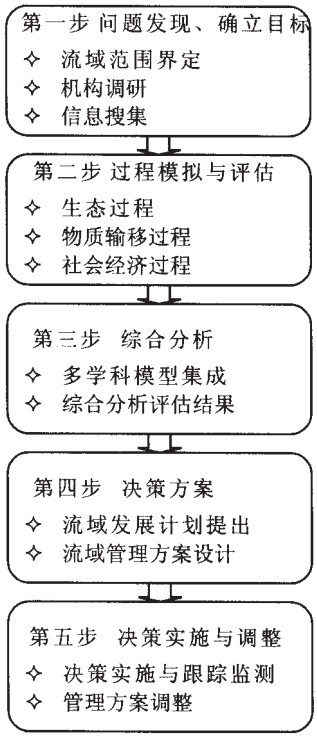


图1 流域综合分析与管理过程
Fig.1 WAM Process

WAM提出的流域管理实施分5个步骤(图1):(1)通过对流域、部族、社团进行调查发现关键问题,确定参加决策委员会的人员组成,收集有关问题需要的信息;(2)利用一系列的技术模型对流域过程进行模拟,获得有价值的信息,从不同学科的角度对问题进行分析;(3)建立综合模型,对不同学科模型进行集成,综合评估;(4)根据评估结果确立流域发展计划和管理策略;(5)实施计划,并进行跟踪检测,了解流域发展计划和管理方案的实施状况,确保计划和方案的正确实施,并发现其中存在的问题,进一步对计划和方案进行调整.

## 2 流域综合管理的关键技术

由流域综合管理的实施过程可以看出,针对某一流域问题,需要从与其联系的水、土、气、生、人等众多要素出发,既要分析和模拟单一流域过程,又要分析不同流域过程之间的联系及响应过程,这一过程一方面需要海量的流域信息支持,另一方面需要针对多学科流域问题的智能化综合决策技术.因此,流域信息化、流域过程分析模型化、综合决策智能化成为流域综合管理部门进行科学决策的保障.

### 2.1 流域信息化

流域信息技术包括流域信息的采集、组织、管理等. 传统的流域数据采集与管理方法主要有各种统计年鉴、历史文献记录、野外观测台站网络记录、调查访问. 这些方法至今仍然在流域分析和管理中起着非常重要的作用.然而传统的方法存在数据采集周期长,投入大,采样布点稀疏等缺点,很难全面地反映流域的整体特征. 近年来计算机技术、遥感技术、地理信息系统技术在流域信息化中起着越来越大的作用.

目前遥感技术已经成为流域信息获取的重要手段.对地观测系统利用多平台、多分辨率、多波段获取不同尺度流域的多方面信息,空间分别率可达0.5 m到4000 m,光谱从紫外、可见光、红外到微波,波段从1个到240个,时间分辨率可以从每隔十多天一次,到每天三次[8]. MSS、TM和SPOT卫星影像已经在资源、环境等众多领域中得到广泛应用. 如流域土地利用信息提取、植被类型划分、地质信息提取、水深调查、土壤含水量分析以及基础地图更新等方面的应用. 近年来发展的高光谱、高分辨率遥感使遥感方法在流域信息采集中越来越呈现出更为广阔的前景. 如通过高光谱遥感可以获得群落的物种组成、生物生长状况、水质变化等;高分辨率遥感影像可以提供流域更高精度的信息,如不同树种树冠的参数等.

在人类对地球不同层面、不同现象的综合观测能力达到空前水平的现代,如何处理、传输、组织和应用流域信息,满足流域综合管理的需要是流域信息化建设的又一重要内容. 自1998年美国总统戈尔在加利福尼亚科学中心发表《数字地球:对21世纪人类星球的理解》演讲中提出"数字地球"的概念后.数字流域作为"数字地球"多层次构架下的一个重要结点,也得到流域管理部门的广泛重视[9]. "数字流域"是综合运用遥感

(RS)、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)、网络技术、多媒体及虚拟现实(VR)等现代高新技术对全流域的地理环境、自然资源、生态环境、人文景观、社会和经济状态等各种信息进行采集与数字化处理,构建全流域综合信息平台和三维影像模型,使各级政府部门能够有效地管理整个流域的经济建设,作出宏观的资源利用与开发决策.

一些发达国家如美国、日本、英国、法国、加拿大等,纷纷通过政府投资和立法形式建立了很多国家级数据中心和大型数据库系统作为信息基础设施的核心内容,象美国航空航天局(NASA)的 9 大数据中心,美国能源部、农业部、人口调查局信息中心等,在科学研究、国家战略决策和提高公众科学素质中发挥了巨大的作用. 美国环境保护署把流域信息建设及信息服务作为其职能建设的一个重要方面,20 世纪 90 年代期间,美国 EPA 建设的国家水文数据库(National Hydrography Dataset, NHD),以流域界限对自然、社会、经济信息进行组织,建立流域基础信息平台. 目前这一信息平台已经在流域模拟、水质管理等方面发挥出巨大的作用,如美国 EPA 以 NHD 和 USGS 信息平台的支撑下,开展了全国范围的流域污染日负荷评估(TMDL)、流域健康评价等,成为流域计划与决策制定和实施的重要科学依据.我国流域信息化水平与发达国家相比存在较大的差距,除国家基础地理信息建立了相对完备的基础数据库及数据库管理机制以外,还没有建立针对流域综合管理的信息平台,水利部及流域管理部门的流域信息多针对流域洪水调度目标,而且不同流域信息如水质监测、气象、植被等分别属于环保、气象和农林等不同部门,部门之间缺乏统一的规范,且这些部门没有相关的信息发布管理机制和义务,为流域综合管理实施造成了很大的障碍.

### 2.2 流域模拟与综合决策

流域模拟系指通过分析流域自然、社会、经济复合系统的主要动力过程,提取关键因素,并对关键因素和过程进行合理地定性、定量描述,实现模拟结果和现实的充分逼近.流域模型构建是对流域认识的深化,可以进行预测、诊断、综合、管理和决策. 流域模型将水文学、生态学、社会经济等不同学科知识进行模块化、智能化表达,使流域决策者能够充分利用不同学科发展的最新成果,并对复杂环境问题的众多方面进行全面地分析,在一定程度上克服了流域管理者因专业和个人经验所限作出片面的管理决策.通过流域模拟,可以经济、高效地分析流域问题,可以预测流域未来的环境条件,分析和比较备选决策方案实施的可能后果,从而选择最佳的决策方案或对决策方案进行合理调整,减少流域决策实施的盲目性.

近年来随着计算机技术、地理信息系统技术、遥感技术、流域监测示踪技术、网络技术、虚拟仿真技术的发展,水文、生态、社会经济等领域已经采用先进手段建立各自学科的建模分析与决策体系,尤其是水文学模拟技术,已经形成了广泛适用的模拟模型,并应用与水资源管理、水利工程和灾害防治中. 然而,面对复杂的流域问题,单学科流域模型在流域综合管理应用中具有很大的限制性,综合决策需要不同学科广泛参与,需要将各个学科模型实现一定程度的集成[10-12]. 目前,对流域综合决策模型的研究还处于起步阶段,对其概念的理解也比较模糊,主要是对综合的认识不同,一些模型构建者把两个或两个以上模型的集成称为综合模型,如地下水和地表水模型的集成,这两个模型事实上属于一个学科范畴. 大部分学者认为,综合模型应该是两个或两个学科以上的综合[13],需要具备从自然、社会、经济等多个方面分析和解释流域问题的功能,通过全面考虑最终作出正确的决策,因此,流域综合模型表现为多学科的综合. CIESIN 阐述了综合模拟和评估的概念:"流域综合管理模型具有两个特点,一是流域综合模拟与评估需要提出一些重要的决策参考信息,而不是单一学科的研究深化;二是需要将不同学科、领域、方法在某种程度上实现更加广泛的结合,而不是单一学科分析某一问题[14].

目前,已经应用的综合管理模型主要包括以下几类:(1)生物物理模型(Biophysical Model),(2)生态经济模型(Ecoeconomic models),(3)综合管理模型. 大部分的流域模型属于生物物理模型,生物物理模型主要集成流域的水文过程(包括:降雨径流、水盐动态、沉积物与营养流、地下水过程)和生物过程. 这些综合管理模型主要针对流域的水土资源保护政策,分析不同的土地利用模式可能导致的环境响应,模型往往很少考虑管理的经济和社会响应. 这些模型有 IQQM, SWAT, AGNPS, WATERSHEDSS,和 HYDRA. 生态经济模型也应用到许多流域和地区[15],这类模型引入了较多的经济过程分析,建立优化决策模型,然而模型分析生物、生态

过程中进行了很大的简化,通过建立简单的指标体系集成到经济模型中. 综合管理模型一般都有经济分析过程,但是模型往往很少考虑流域各种群体的响应机制,而且经济分析多为决策措施的费用分析,认为决策过程可以得到完全实施. 比较好的综合管理模型主要是水文过程与经济过程相结合的流域综合管理模型,模型包括水文过程模拟以及水资源分配的多目标决策,洪水、污染的经济损失评估和措施的优化决策.

## 3 流域综合管理中的技术问题

从流域综合管理实践的技术来看,目前流域综合管理实践存在以下几个方面的技术问题:

### 3.1 流域关键要素信息采集、知识发掘与共享

近年来虽然流域信息采集技术上取得了很大的进展,但是在进行小尺度定量化研究中仍然面临着信息缺乏的难题,造成这种问题主要可以归结为三个方面的因素:

3.1.1 一些关键流域信息采集问题 在流域过程模拟中,气象、水文、水质、土壤含水量以及一些生物指标(物种高度、叶面指数等)仍然依靠台站和野外实地监测获取,由于台站、监测点分布稀疏,很难获取小尺度流域定量化研究所需要的空间连续信息. 虽然插值技术在一定程度上改善了空间连续信息获取的精度,如样条插值、地统计插值技术等,但是因点位稀疏而使模拟结果具有较大的不确定性仍然是流域过程模拟面临的一个重要难题. 有些要素信息获取至今还没有很好的技术方案,如土壤含水量监测非常困难,而土壤水分却是流域水文模型中非常重要的因素之一,学者们一直希望能够从遥感信息获取土壤水分的空间分布信息,考虑到微波测量的物理参数都与土壤水分有关,不少学者探讨利用微波和热红外遥感获得土壤含水量的分析方法,而微波和热红外遥感反映水分信息主要为表层土壤的总含水量,对土壤水分的垂直分布仍需要通过实测获取. 我国通过分布于全国的102个站在1981-1991年进行监测建立了土壤水分数据库,显然仅仅依靠这102个点位的数据只能在大尺度上了解土壤水分分布,而在小尺度定量研究中应用比较困难.

3.1.2 信息发掘技术 遥感技术不断发展的同时,也面临着许多困难与挑战,面对海量遥感数据,当前的瓶颈问题仍然是遥感数据的自动处理及信息提取问题. 目前,对TM/ETM和SPOT信息的分析、处理和应用已经相对成熟,而对快速发展的高分辨率、高光谱遥感数据在流域模拟中的应用还处于探索阶段. 数据库技术相对于信息采集技术的滞后发展也是限制海量信息应用的一个重要方面,现今的数据库大多应用仍停留在查询、检索阶段,数据库中隐藏的丰富知识远没有得到充分的发掘和利用,致使人们经常面临被数据淹没,但却饥饿于知识的状况.

3.1.3 大比例尺流域信息库建设及共享机制 流域综合管理涉及多学科信息,体现高度的综合性.在面对一个流域问题时,需要流域水、土、气、生、人等众多要素的信息. 而这些信息快速收集与集成依赖于国家基础信息库的建设与共享. 由于数据整理工作量庞大,目前的基础数据库仍以中、小比例尺为主,大比例尺信息库还需要逐步建设. 另外由于缺乏信息披露和共享机制,导致一些流域基础信息标准不一,相互封闭,很难得到有效应用. 我国目前在数据库及共享建设和发达国家存在很大的差距,数据和信息部门垄断导致不合理收费增加了流域综合管理的实施成本,数据缺乏统一管理导致规范不一而出现集成应用的困难,相互封闭导致重复建设产生极大的浪费等.

### 3.2 流域综合管理决策工具开发与应用

面对流域综合管理的多学科问题,基于模型的决策工具非常重要,而在这方面的研究中还存在以下急需解决的问题.

3.2.1 时空地理信息分析与决策模型的发展 由于流域地理信息大部分都具有位置特征,因此数据多以GIS的某种格式储存和管理. GIS在辅助决策中已经得到广泛应用.然而目前的GIS在分析流域动力过程中存在明显的缺陷,其一是流域动力过程表现为流域要素相互作用而不断演变的时间过程,GIS的数据格式中普遍缺乏对时间的描述. 其二是现有地图运算功能被设计为一次只能运行一个步骤,一个涉及到好多时段的模拟需要地图计算器程序分别进行当前地图数据、下一个时段状态以及中间输出的多次装载,这是很低效的. 而解决这些问题有待于时空地理信息系统的发展.

3.2.2 流域多过程综合模型问题 流域综合管理与决策需要多学科综合的模拟模型,而多学科综合模型常常

遇到 3 个方面的难题,一是流域多学科信息的综合和集成. 由于不同的学科涉及的研究对象不同,而各个研究学科研究对象又有不同的时间和空间尺度,如土地利用研究空间尺度为地块,时间尺度为年或更大;水文模拟的最小尺度为集水区,时间尺度可为一次降雨时间或月、年等;社会经济的空间尺度为行政区,统计数据的时间尺度一般为年. 受时空尺度不同的影响,在建立综合模型时,需要解决不同学科数据源模拟节点的衔接问题. 二是流域多学科模型需要解决流域生态、经济统一度量和评估标准问题. 我们已经习惯于分析流域生态问题时把人类活动作为外部因子来考虑,分析社会经济时把流域生态作为资源来考虑,而没有把人类活动和生态作为一个系统进行分析和研究,目前环境经济学提供了对生态环境进行货币度量的方法,解决生态经济综合分析问题,但是这些评估方面还存在很大的不确定性. 三是流域多学科模型集成中累积误差问题. 不同学科模型的建立都依赖一定的监测或统计信息,而监测或统计信息都具有一定的不确定性,如采样点空间分布、样品分析方法、统计方法或其他人为因素影响,综合模型表现为某一学科模型模拟结果为另一学科模型的输入信息,这一过程会因集成步骤增多而使累积误差增大,这极大地限制了综合模拟的预测能力.

3.2.3 流域模型的通用化问题　流域模型通用化有两个方面的含义,一是流域模型应用具有广泛适用性.目前大部分流域模型多为一定区域下的研究成果,由于模型一般只适应于某一特殊区域,而且不同学者从不同角度构建模型,缺乏统一的标准,在应用中缺乏普遍适应性,为解决这一问题需要针对某一决策目标建立统一标准的信息采集,并建立统一的参数获取方法和分析评估体系. 通用模型的另一方面含义是指流域模型不仅可以由专业人员运行,还应有友好的界面以及可视化良好的表达方式,使研究成果能够快速地向实践应用转化.

## 参 考 文 献


1 Isobel W H. Integrated watershed management: Principles and practice. New York: John Wiley &Sons Inc, 1998: 1–14

2 Lee T. Water management since the adoption of the Mar del Plata Action Plan: Lessons for the 1990s. *Natural Resources Forum*, 1992, **16**(3): 202–211

3 Mitchell B. The evolution of integrated resource management. In: Lang R ed. Integrated Approaches to Resource Planning and Management. Banff Centre School of Management, 1986: 15–20

4 Ewing S A, Grayson R B, Argent R M. Research integration in ICM : Review and Discussion Docment. CEAH Report 1/97, Centre for environmental applied hydrology, University of Melbourne, Melbourne, Victoria. 1997: 23–24

5 Margerum R D. Examining the practice of integrated environment management: Towards a Conceptual Model. Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin–Madison, 1995.

6 Born S M, Sonzogni W C. Integrated environmental Management: strengthening the conceptualization. *Environmental Management*, 1995, **19**(2), 167–181.

7 Mike B, Joanne G, Jean C. Watershed analysis and management guide for tribesv(online). EPA: 2000, 7–9

8 承继成, 林 珲, 周成虎主编. 数字地球导论. 北京:科学出版社, 2000: 85–100

9 张欧阳,张红武. 数字流域及其在流域综合管理中的应用. 地理科学进展, 2002, **21**(1): 65–72

10 Born S M, Sonzogni W. Integrated environmental management: strengthening the Conceptualization. *Environmental Management*, 1995, **19**(2):167–181

11 Villa F, Costanza R. Design of multi–paradigm integrating modeling tools for ecological research. *Environmental Modelling and Software*, 2000, **15**(2): 169–177

12 Parson E A, Fisher V K. Integrated assessment models of global climate change. *Annual Review of Energy and the Environment*, 1997, **22**: 589–628

13 Rotmans J and Van A M. Integrated assessment: growing child on its way to maturity. *Climatic Change*, 1996, 34: 327–336

14 Ciesin. Thematic guide to integrated assessment modeling of climate change. In Consortium for International Earth

Science Information Network(online). 1995, University Center, Michegan

15 Hu D Y, Ready R, Pagoulatos A. Dynamic optimal management of wind-erosion rangelands. *American Journal of Agricultural Economics*, 1997, **79**(2), 327-340

# Methods and Technology of Integrated Watershed Management

LI Hengpeng, CHEN Wen & LIU Xiaomei

*(Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing* 210008, *P.R.China)*

**Abstract**

Watershed, as geography unit with specific boundaries, is a compound ecosystem, within which all components are inextricably linked by water. These components interact with one element responding to the action or change of another. Nowadays, integrated watershed management has been regarded as an efficiency approach of solving the conflicts between resources utilization and environment protection. However, Integrated Watershed Management need deal with lots of multidisciplinary problem, intergovernmental harmony issues. There are no mature theory and actable methods, so the integrated watershed management only limited to a perfect goals. This paper, based on the research and experience review about watershed management, discusses the technology integrated watershed management. The integrated watershed management can be performed by five steps, i.e. (1)To confirm the watershed problem and collecting the information about it; (2)To analyze and assess the watershed process; (3)To make integrated analysis and assessment; (4)To make out the watershed plan; and (5)To actualize the watershed plan and make some adjustment according to the reality. In integrated watershed analysis and management, it is the key technology to develop watershed information and integrated model. Still, there are some important watershed elements information can´t be acquired efficiently, including runoff, water quality, soil water and so on. In China, Some watershed database in large scale need be developed and effective share regulations need be make out. In watershed simulation technology, the problems about integration between GIS and watershed process model, different disciplined models and professional model visualization need be solved.

**Kewwords:** Integrated watershed management; watershed modeling; information techniques; ecological system