

## \* 专栏：基于信息技术的环境变化及其效应研究 \*

生态—水文信息获取、过程模拟与三维虚拟表达  
一体化的框架体系研究

官辉力\* 朱琳 李小娟 潘云

首都师范大学资源环境与旅游学院, 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048

**摘要** 为了满足目前基于遥感技术的生态—水文过程研究需求, 提出了一套基于水文过程变化下生态响应的监测技术体系; 以及生态—水文遥感信息快速处理、生态—水文过程模拟和生态—水文环境的三维虚拟表达于一体的框架结构. 该框架体系利用大型遥感数据处理系统 CASM ImageInfo 对遥感监测的生态—水文过程要素进行快速处理; 基于该系统插件式的开放体系结构, 利用 Visual Studio, ArcGIS Engine 以及 SQL Server2000 建立生态—水文过程的空间分析、模拟模块以及生态—水文数据数据库管理系统. 此外, 集成 JX-4 全数字摄影测量系统的技术优势, 用于获取 DEM 等数据, 并采用虚拟现实技术实现生态—水文环境的三维虚拟表达, 为研究者基于遥感技术进行生态—水文过程研究提供全数字化流水线式处理流程.

**关键词** 生态—水文 遥感监测 CASM ImageInfo Jx-4 三维虚拟表达

全球变暖背景下的都市郊区水系统和生态系统受到强烈的人类扰动, 引发了一系列生态与环境问题. 近几年, 半干旱半湿润地区由于连续干旱, 水循环过程(大气降水—地表水—土壤水—浅层地下水)发生明显的变化, 地表水径流量锐减, 地下水超采现象严重, 包气带是联系地表水和饱和地下水的纽带, 而土壤水分则是土壤体和土壤肥力的重要组成部分, 其含量是不同类型植物生长的主要控制因素之一, 因此, 自然生态系统的区域特征(格局分布)、微观特征(叶面积指数)也随着水文过程的变化发生响应. Rodriguez-Iturbe(2000)指出生态与水文之间的时空联系研究是未来具有发展前景的领域之一<sup>[1]</sup>. 在流域尺度上分析生态与水文之间的时空联系、进行生态水文过程模拟, 需要大量的流域尺度的生态水文参数. 常规的监测方法费时、费力、不经济, 难以满足对生态水文环境实时、长期

监测的要求. 遥感技术具有全天候、多时相以及不同空间观测尺度等特点, 通过遥感解译结合地面调查, 可以快速获取流域尺度的植被叶面积指数、生物量等植被参数与蒸发蒸腾、土壤湿度、地表温度等参数<sup>[2-5]</sup>为生态—水文模拟提供参数输入、初始条件设置与模型验证数据.

流域生态水文模型分为专家决策模型<sup>[6]</sup>、经验统计模型<sup>[7]</sup>、随机模型<sup>[1]</sup>和物理模型<sup>[8,9]</sup>, 当前生态水文模型研究多侧重在通过建立物理模型(physically based models)来描述生态水文过程及其反馈. 生态—水文过程主要包括降水、蒸发、径流、渗透、生物量和叶面积指数等, 涉及地表水模型、浅层地下水流模型以及植物响应模型, 到目前为止, 这些模型还没有完全耦合, 需要对各种子过程进行完全耦合式模拟, 系统地揭示生态过程与水文过程交互与反馈机制.

2009-05-22 收稿, 2009-06-26 收修稿稿

\* 通信作者, E-mail: gonghl@263.net

利用遥感影像能够获得丰富的生态—水文数据,使数据可视化日益成为迫切需要解决的问题。生态—水文过程监测、过程模拟和评价结果通常以二维平面图或表、2.5维空间数据形式进行表达和处理<sup>[10,11]</sup>,难以在三维空间中反映生态环境的真实状态,更不能满足人们对大量的生态—水文数据进行快速的查询、分析要求。三维虚拟表达技术是一种由计算机生成的高级人机交互系统,是一种以视觉为主的可感知环境,可利用计算机收集或生成的数据进行虚拟建模,将生态—水文过程中涉及的多来源的各类数据(包括空间数据和属性数据)融合成三维图形图像,用形象直观的图像来指引检索过程,加深研究者对生态—水文数据含义的理解,让研究者在三维空间环境中掌握生态环境过程。

目前,通用的遥感图像处理软件,如 PCI Geomatica、ERDAS Imagine 以及 ENVI 等,功能相对强大一些,但界面不太适合国人的习惯,且坐标系缺少国内通用的北京/西安坐标系。CASM Image-Info 是面向我国遥感应用需求而研制的一套集遥感图像处理、GIS 分析、GPS 等于一体的多功能遥感数据处理软件,具有 TB 级海量遥感数据处理、全组件化遥感软件体系设计、通用数据处理引擎、一体化数据模型等特点。

JX-4 数字摄影测量工作站是基于普通微机的数字摄影测量系统,具有专门的立体影像显示卡、严密的子像素影像放大功能、可视化立体编辑检查环境等特点,保证了测量精度以及生产的数据质量。

综上所述,针对目前生态—水文过程研究的需求以及 CASM ImageInfo 和 JX-4 的技术优势,本文提出一套基于遥感监测的集数字图像处理、生态—水文过程模型、三维可视化表达于一体的生态—水文过程研究方法。利用 CASM ImageInfo 系统对多种来源的影像数据进行处理,在该系统中采用组件式开发,将生态—水文过程涉及的模拟模型进行耦合,并提出与 JX-4 的集成,基于影像数据实现数字高程模型、数字正射影像等数据信息的采集;采用虚拟现实技术将实测、模型、分析数据等进行可视化表达,为研究人类活动扰动下的区域水循环过程及生态响应过程提供支持。

## 1 生态—水文信息获取

### 1.1 生态—水文监测指标

为了正确揭示生态—水文环境质量的现状、变化和趋势,需要确定出合理的监测指标。通常生态环境监测包括环境要素变化指标、生物资源变化指标以及人类活动变化的指标。本次遵循典型性、可取性、可比性、易操作性等原则选取生态—水文监测指标,确定出人类活动扰动下半干旱半湿润地区的生态水文监测指标。气象要素、水文要素、土壤要素、植被要素以及人类活动要素作为干旱半湿润地区生态—水文环境监测的一级指标,针对以上要素又可包含多个监测指标(见表 1)。

表 1 生态—水文监测指标体系

一级指标	二级指标
气象要素	降水量、蒸散发、气温
水文要素	水资源分布、水体质量、地表径流、地下水位
土壤要素	土壤水分/湿度、土壤 N/P 含量
植被要素	植被种类、植被指数、植物生理
人类活动要素	土地利用、水利工程、地下水开采

### 1.2 生态—水文过程遥感监测

针对以上生态—水文监测指标,遥感技术可以用来提取多种气象要素和水文要素参量(蒸发量、降水量、土壤水分等),有助于定量表达区域水文过程及时空变化规律。

微波遥感可测量不同地貌和植被覆盖的土壤湿度条件。合成孔径雷达(SAR)在植被分类、生物量估算、水体识别、土壤湿度信息提取等方面也显示了良好应用潜力。结合野外定点实验及观测数据,进行野外数据订正,遥感技术能更准确有效获取不同时空尺度多元信息,为多尺度生态—水文科学耦合研究提供重要参数。

此外,航天、航空和地面协同的多时空分辨率全球对地观测系统在水文、生态和环境研究中应用越来越广泛,可获取的参量类型和数据反演精度都越来越高<sup>[12]</sup>。遥感技术可提供从生态系统到生物群落(分辨率从 1 m 到 1 km)有关群落结构和个体冠层的信息,精确获取生态系统中各种复杂地物属性和

生化参量, 满足各种模型输入参数的多类型与高精度需求。

## 2 生态—水文遥感监测信息处理

生态—水文遥感监测涉及雷达数据、多光谱数据、高光谱数据以及航空航天数据等, 不同种类的遥感数据, 其图像处理技术各异。目前, 通用的一些软件的遥感影像处理功能各有特色, 如 PCI 适合于影像制图, ERDAS 的数据融合效果最好, 而 ENVI 在针对像元处理的信息提取中功能最强大, ER Mapper 对于处理高分辨率影像效果较好<sup>[13]</sup>。这些国外软件的功能相对强大一些, 但是坐标系缺少国内通用的北京/西安坐标系。找到一个能够处理多种图像格式、效果理想的遥感数据处理软件显得迫在眉睫。

### 2.1 生态—水文遥感信息处理

CASM ImageInfo 系统可以解决以上问题。该系统是一个国产软件, 针对处理过程中产生大量临时文件问题, 采用基于流水线式的管道串接技术及一体化集成技术, 实现处理模块间的数据流水线式无缝传递, 使遥感数据处理效率大幅度提高。同时, 发展了插件式的开放体系结构, 实现遥感软件底层平台的可扩展性、可伸缩性; 以基于软件总线的体系结构和构件技术, 实现软件模块的“即插即用”, 通过定义统一的插件接口, 使系统可以采用插件方式不断集成新的软件功能。此外, 针对 TB 级海量遥感数据处理难题, 研制了基于智能分块机制的强劲通用数据处理引擎, 发展了段页式缓存技术、LOD 影像金字塔技术、集群文件系统 I/O 技术, 实现了 TB 级影像数据的快速处理。

与 ERDAS IMAGINE、PCI Geomatica 等国外知名遥感软件相比, ImageInfo 系统的功能和性能均达到国外同类软件先进水平。

### 2.2 生态—水文过程分析与模拟

由于 CASM ImageInfo 系统采用组件化的体系结构设计, 能够实现软件模块的“即插即用”, 且提供了底层函数库和类库, 支持 C++、Visual C++ 等工具的构件开发。为了掌握空间上水文过程以及生态响应, 本文提出利用 Visual Studio 建立

ArcGIS Engine 应用程序, 实现对生态—水文过程的空间分析; 利用组件式开发将植物响应模型、地表水模型和地下水模型进行耦合, 在水文过程的基础上, 结合水分平衡原理, 考虑不同系统之间的水量交换, 实现生态—水文过程的完全耦合式模拟; 并使用 ArcGIS Engine 连接 SQL Server2000 数据库, 该数据库用于存储和管理生态—水文遥感监测参量、实测数据、历史数据以及模型数据等信息。

**2.2.1 综合分析 本底调查:** 依据遥感技术收集的生态—水文要素参量, 采用统计的方法分析气候数据、水文数据、土壤数据以及生态响应数据(植被覆盖、植被群落等), 获取生态—水文信息的空间分布特征。

**生态—水文相互作用:** 根据不同时期水文要素参量和区域植被生态参量, 结合收集的与水文过程和生态变化高度相关的人类活动参量数据, 采用数理统计模型等, 研究特定环境梯度带的不同水文条件下, 植物生态结构(类型、数量)及其时空演替规律。

**2.2.2 生态—水文过程模拟** 考虑到 HSPF (hydrological simulation program-FORTRAN) 模型是模拟人为因素影响下的流域水情和水质, 用于水文计算和预报。MODFLOW (modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model) 用于模拟孔隙介质中的地下水流(源代码开放), 是目前世界上最为普及的地下水运动数值模拟的计算机程序。而植物生态响应(model for vegetation response) MOVER 模型, 则能够反映各种水文特征变化引起的生态系统响应关系。本文提出在 CASM ImageInfo 开放体系结构中, 将 HSPF 模型、MODFLOW 以及 MOVER 模型进行有机集成, 根据不同模型间相同参量实现联接, 如地下水流数值模型中地表水、大气降水可作为源汇项处理。在 Visual Studio 搭建的框架下, 采用组件式开发, 结合水分平衡原理, 并制定不同模型间的数据接口, 实现三个模型的耦合。示意关系见图 1, 最终建立具有实际物理意义的生态—水文模型模拟研究区的水文过程以及植物响应。

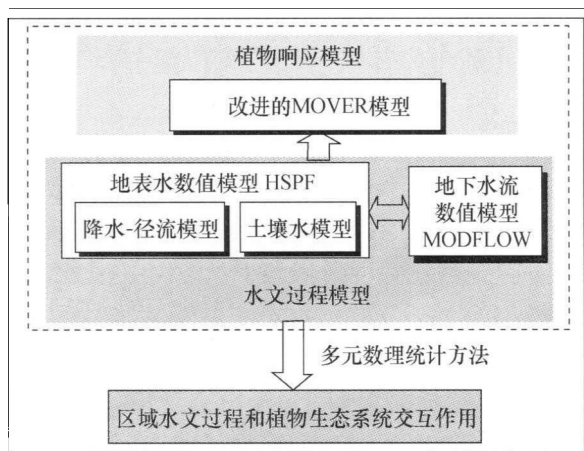


图 1 生态—水文过程建模示意图

**2.2.3 生态—水文数据管理系统** 生态—水文数据管理系统由数据库 SQL Server(遥感监测、野外实测和实验获取以及历史数据)、模型库以及专家知识库、决策支持系统组成, 其中空间数据以要素数据集 (FeatureDatasets) 的形式存储, 采用数据

仓库技术和 GIS 相结合的建库方案来建立数据库, 实现数据的有序管理和共享服务. 该数据管理系统存储了大量的影像数据、空间数据、属性数据等, 主要是为分析生态—水文信息的空间规律(采用 ArcGIS Engine 连接数据库)、生态—水文过程分析以及模型建立提供基础数据, 同时, 也为生态—水文环境的三维可视化表达提供数据支持(采用 Visual C++ 连接数据库), 满足不同用户的决策支持需求.

生态—水文研究的数据管理系统与生态—水文信息获取、模型建立—级三维表达一体化的理论框架见图 2.

### 3 生态—水文环境三维可视化表达

#### 3.1 JX-4 全数字摄影测量

JX-4 全数字摄影测量系统, 用于对 CASM ImageInfo 系统处理的影像数据进行三维信息的采集, 获取数字高程模型 (DEM, digital elevation model)、

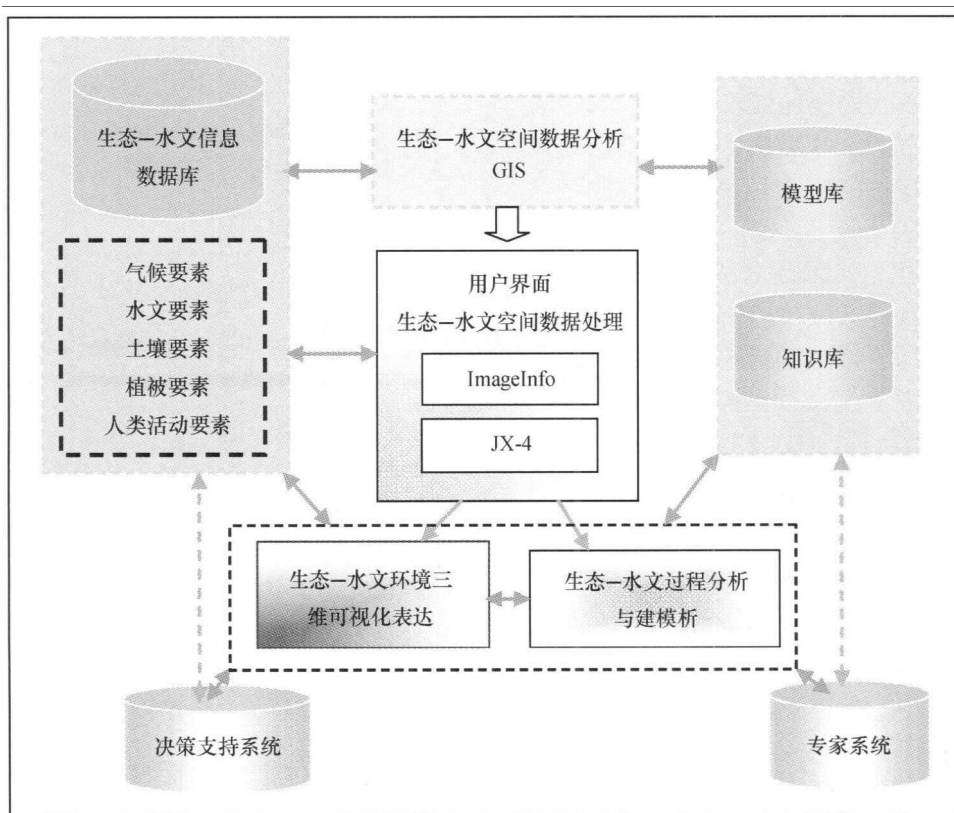


图 2 生态—水文信息获取、模型建立与三维表达一体化的理论框架示意图

数字正射影像(DOM, digital orthophoto map)、数字线画图(DLG, digital line graphic)以及数字栅格地图(DRG, digital raster graphic), 由于这些数据信息以真三维地理坐标形式存储, 能够为生态—水文过程的三维可视化表达提供真实可靠的数据。

### 3.2 三维可视化表达

基于JX-4全数字摄影测量系统获取的地物三维信息数据, 结合生态—水文遥感监测数据以及其

他数据, 采用体视化方式, 利用OpenGL渲染研究区的水文过程(大气降水—地表水—土壤水—浅层地下水)以及生态响应过程, 研究者可从多个角度和方位进行观察, 并进行实时信息查询。图3分别给出了半干旱半湿润地区——北京延庆盆地地下水流场(3(a))、地表生态环境现状(3(b))以及不同水文条件下的生态响应变化(3(c), 3(d))。

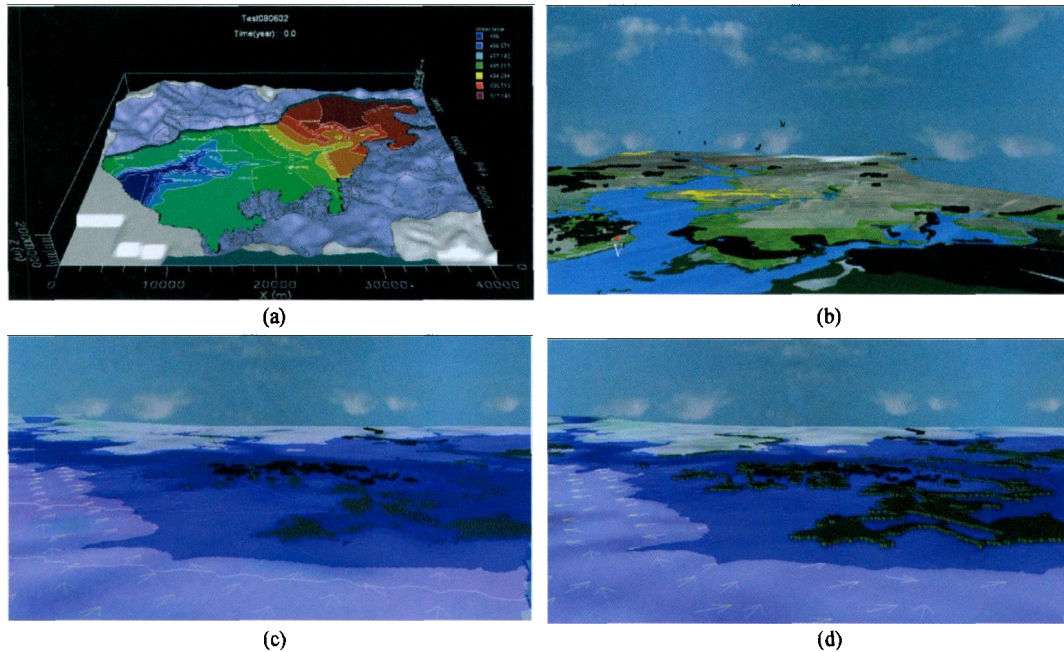


图3 延庆盆地生态—水文环境可视化表达效果示意图  
(a) 地下水流场; (b) 地表生态环境现状; (c), (d) 不同水文条件下的生态响应变化

## 4 总结

本文给出半干旱湿润地区的生态—水文环境监测技术体系, 该体系包括5个一级指标, 15个二级指标, 这些监测指标能够客观反映半干旱湿润地区的生态—水文环境特征。与此同时, 给出了生态—水文遥感信息快速处理、生态—水文过程模拟以及生态—水文环境的三维虚拟表达于一体的框架结构。该框架体系充分发挥了大型遥感数据处理系统CASM ImageInfo, JX-4全数字摄影测量系统的技术优势, 创新性地提取基于CASM ImageInfo插件式的开放体系结构, 建立生态—水文过程的空间分析与过程模拟模块以及生态—水文数据数据库管理

系统; 并采用虚拟现实技术实现生态—水文环境的三维虚拟表达, 让研究者在三维空间环境中掌握生态—水文环境。

## 参 考 文 献

- 1 Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research* 2000, 36(1): 3—9
- 2 Boegh E, Thorsen M, Butts MB, et al, Incorporating remote sensing data in physically based distributed agro-hydrological modeling. *Journal of Hydrology* 2004, 287: 279—299
- 3 Das NN, Mohanty BP, Cosh MH, et al, Modeling and assimilation of root zone soil moisture using remote sensing observations in Walnut Gulch Watershed during SMEX04. *Remote Sensing of Environment* 2008, 112: 415—429

- 4 D'Urso G, Minacapilli M. A semi-empirical approach for surface soil water content estimation from radar data without a-priori information on surface roughness. *Journal of Hydrology* 2006, 321: 297—310
- 5 Seaquist JW, Olsson L, Ardo J. A remote sensing-based primary production model for grassland biomes. *Ecological Modelling* 2003, 169: 131—155
- 6 Droesen WJ. Formalisation of ecohydrological expert knowledge applying fuzzy techniques. *Ecological Modelling* 1996, 85: 75—81
- 7 Latour JB, Reiling R. A multiple stress model for vegetation ('move'): A tool for scenario studies and standard-setting. *The Science of the Total Environment(supp.)* 1993, 1513—1526
- 8 周德民, 宫辉力, 胡金明, 等. 湿地水文生态学模型的理论与方法. *生态学杂志* 2007, 26(1): 108—114
- 9 Hattermann FF, Wattenbach M, Krysanova V. et al. Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment—validation and uncertainty analysis. *Hydrological Processes* 2005, 19: 693—714
- 10 宫兆宁, 宫辉力, 赵文吉. 北京湿地生态演变研究. 2007, 北京: 中国环境科学出版社
- 11 Zhou DM, Gong HL, Liu ZL. Integrated wetland ecologic assessment of environmental condition in water catchments: Linking hydro-ecological modeling and Geo-information techniques. *Ecological Modeling*, 2008(214): 411—420
- 12 Groeneveld DP, Baugh WM. Correcting satellite data to detect vegetation signal for eco-hydrologic analyses. *Journal of Hydrology* 2007, 344: 135—145
- 13 李斯泽. ENVI, ERDAS, PCI, ER \_ Mapper 的特点与统计分类. *电脑知识与技术*, 2008, 3(8): 1776—1777