

# 遥感技术在分布式水文模型中的应用研究进展

姜尚堃, 李 飞, 陈立峰

(山东省淮河流域水利管理局规划设计院, 山东 济南 250100)

**摘 要:** 遥感技术与分布式水文模型的深入结合, 推动了现代水文学科的发展。在简要介绍分布式水文模型与遥感技术发展状况基础上, 对遥感技术在分布式水文模型应用过程中出现的降水、蒸散发、河川径流、陆面温度、土壤水分、土地利用/土地覆盖、叶面积指数等参数, 给出详细的反演方法。结合技术及模型本身特性, 指出遥感技术在分布式水文模型应用中存在的问题, 并展望研究发展方向。

**关键词:** 遥感技术; 分布式水文模型; 水文参数; 遥感反演

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)01-0174-07

## Research progress of remote sensing technology application in distributed hydrological model

JIANG Shangkun, LI Fei, CHEN Lifeng

(Plan & Design Institute, Shandong Province Huaihe River Basin Water Conservancy Administration, Jinan 250100, China)

**Abstract:** The deep combination of remote sensing technology and distributed hydrological model promotes the development of hydrological science. This paper briefly introduces the research status of distributed hydrological model and remote sensing technology, and then gives out the parameters inversion method of precipitation, evapotranspiration, river runoff, land surface temperature, soil moisture, land-use and land-cover change (LUCC) and leaf area index in the process of remote sensing technology application to the model. In terms of the characteristic of remote sensing technology and model, the paper points out the existing problems and further research direction.

**Key words:** remote sensing technology; distributed hydrological model; hydrological parameter; remote sensing inversion

## 0 引 言

随着水文模拟技术的发展, 水文模型逐渐成为水文科学中一种不可或缺的研究手段, 并已成为水文学研究的热点。水文模型研究始于20世纪50年代, 70-80年代得到飞速发展, Stanford模型、TANK模型、SHE模型以及我国的新安江模型即出现于此时。20世纪80年代后期至今, 随着对水文循环中各要素的深入研究, 以及计算机、地理信息系统(GIS)和遥感技术(RS)的迅速崛起及深入应用, 使构造具有一定物理基础的分布式水文模型成为可能, 这一阶段出现了分布式、半(准)分布式水文模型的概念, 水文模型类别得到扩展, 分布式水文模型是水文模型研究的重点。本文从分布式水文模型、遥感技术的概念出发, 探讨遥感技术深入到分布式水文模型研究中涉及到的参数反演方法, 为今后进

行两者的深层次研究提供依据。

## 1 分布式水文模型与遥感技术

水文模型依照是否考虑水文过程的随机性问题, 可分为确定型、随机型及混合型三类。其中按水循环要素过程的描述不同, 确定型水文模型又可进一步细分为经验式(或“黑箱”)、概念式(或“灰箱”)及物理式(或“白箱”)水文模型。

依据模型研究的空间尺度, 水文模型又可划分为集总式和分布式水文模型。集总式水文模型使用的微分方程一般不考虑水文过程、输入变量、边界条件和要素几何特征的空间变异性, 模型中的水文过程通常由水力学公式或经验公式进行描述, 将整个流域作为一个整体进行研究。集总式水文模型通常属于经验式或概念式水文模型, 代表模型有Stanford、HEC21、HYMO、RDRB、SSARR、水箱模型以及

收稿日期: 2012-10-06; 修回日期: 2012-10-28

基金项目: 水利部公益性行业专项经费项目(201201022)

作者简介: 姜尚堃(1980-), 男, 山东济南人, 工程师, 主要从事流域水利规划设计研究。

我国的新安江模型等。分布式水文模型使用的微分方程通常充分考虑水文过程、输入变量、边界条件和要素几何特征的空间变异性,具有分散输入、集中输出的特点<sup>[1-2]</sup>。分布式水文模型通常属于物理性模型范畴,代表模型有 MIKE SHE、TOPMODEL、SWMM、SWAT、WSRFS 等。近年来,分布式水文模型发展迅速。截止目前,SWAT 模型已经发布了 ArcSWAT 2012. 10. 1 Beta6 for ArcGIS 10 (2012 - 07 - 19), VIC 模型已经推出了 VIC 4. 1. 1 版本 (2009 - 08 - 11)。

分布式水文模型从水循环动力学机制来描述水文现象,对水文过程的各要素进行详细系统的模拟。分布式水文模型的建立需要大量高精度数据支撑,缺乏足够数量和质量的试验数据时无法建立。传统地面观测站网的密度远不能满足模型对数据的要求。遥感数据凭借其高速、精确、及时、范围广、稳定、连续、动态、经济、可重复等诸多优势,为其在分布式水文模型中的广泛应用提供依据<sup>[3-5]</sup>。

遥感技术是一种从空间平台上通过电磁波,高屋建筑观测地球,获得地球表层信息的理论方法。任何绝对温度在零摄氏度 ( $-273.16^{\circ}\text{C}$ ) 以上的物体,都具有反射、吸收和辐射不同波长电磁波的特性,遥感技术正是基于这种特性来识别地物信息特征。遥感数据能够提供流域空间特征信息,是描述流域水文变异性的最为可行的方法,尤其在缺乏地面观测站点地区。遥感技术不但能够提供土地覆盖、水体特征及地形等基本下垫面数据,还能对降水、蒸发量、径流、土壤含水率及地表温度等进行演算,为模型的验证创造条件<sup>[6]</sup>。遥感技术变化的日新月异在一定程度上促进了分布式水文模型的蓬勃发展。

## 2 遥感技术在分布式水文模型中的应用

当前,遥感技术在分布式水文模型中的应用主要分为两类:①直接用于水文变量和水文参数的测定与估算,如研究区面积、降水量等;②基于反演机理,利用遥感获取的地表波谱特征推求水文参数,如陆面蒸散发、河川径流、陆面温度、土壤水分、土地利用/土地覆盖、叶面积指数等。利用遥感影像提取水文参数一般分为三步:①利用相关遥感软件对原始遥感影像进行遥感解译、几何校正等预处理;②制作地形特征、水体特征、植被特征、土壤特征和土地利用等遥感专题图;③基于各种参数的反演机理,把遥感影像图的 DN 值转化为特定的水文参数值。参数提取方法可利用程序自动完成,提取多达 36000 个

基本单元的参数信息只需要几分钟<sup>[7]</sup>。大范围参数提取得到快捷实现,为分布式水文模型发展奠定基础。图 1 为利用遥感影像提取分布式水文模型参数过程。

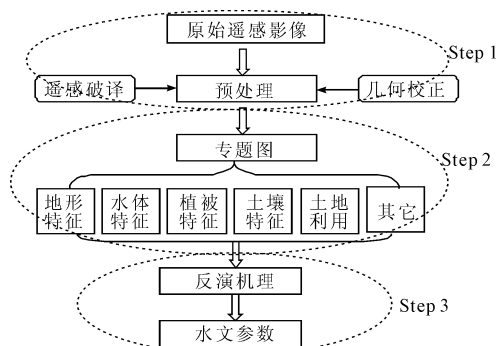


图1 遥感影像提取分布式水文模型参数框架图

### 2.1 降水反演

通过遥感技术获取降水主要有雷达和卫星数据两种途径<sup>[8]</sup>。

雷达测雨原理是利用大气中的降水粒子对电磁波的吸收与散射作用,通过对回波信号的分析处理,确定来自空间采样体积中降水粒子的后向散射的能量,并由计算机计算实时地面降雨量。自 1941 年雷达测雨的思想提出后,雷达被广泛的应用于降水探测中。雷达气象观测站的大量建设,近一步推动了雷达技术研究。目前对于局部地区的大雨和雨速的测量已经进入可操作阶段。

随着各国气象卫星和资源卫星的发射量增多,卫星数据愈渐丰富,出现了多种利用卫星云图推测降水的方法。但由于云层的阻挡,可见光、近红外和热红外传感器不能直接观测降水量,直接用卫星来测定降水量还不是切实可行的。当前通常将卫星技术与传统的地面测量方法结合起来测定降水。国外对降水遥感反演研究较多,比较流行的遥感反演降水方法有云层指数法、阈值法(极限法)、生命-历史法(life-history)、形状分类法、综合方法、微波辐射法等<sup>[9]</sup>,如表1所示。在我国,降水遥感反演起步较晚。1997年,陈乾等<sup>[10]</sup>采用GMS-4卫星的红外和可见展宽云图资料,加入相应的地形高度资料作为因子之一,反演复杂地形下的降水率;2003年,王建华<sup>[11]</sup>应用遥感技术根据不同云层和点雨量间的回归关系,建立面雨量计算模型。并以GMS影像为信息源,对黄河流域雨量进行遥感反演,研究表明反演结果精度较高;2006年,陈利群等<sup>[12]</sup>基于可见光和红外遥感反演降水的原理,在分析黄河源区降水强度与云亮温、云反射率以及云斜率参数的基础上,

建立了黄河源区的基于 NOAA - AVHRR 遥感数据以及同期的降雨观测资料估算 1、3 和 5 h 降水强度模型,分析了降雨的空间分布和洪水的相关性;四川

气象局<sup>[13]</sup>基于自动站降水资料和 FY - 2C 卫星资料估算四川地面降水,并对降水方法反演进行了研究。

表 1 6 种遥感反演降水方法

| 方 法      | 原 理                                                        | 备 注                             |
|----------|------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 云层指数法    | 将云的类型或温度与降雨量建立经验方程                                         |                                 |
| 阈值法      | 以温度极限和云层亮度为基础解析潜在降雨云                                       |                                 |
| 生命 - 历史法 | 区分对流云和其他类型云,非常明显的降雨主要来自对流云                                 | 时间上具有独立性,考虑个别对流云和集团对流云变化速率      |
| 形状分类法    | 应用形状统计 - 分类技术,根据云顶层最低温度以及两个连续图像云顶层平均温差确定降雨量隶属级别            |                                 |
| 综合方法     | 将一个小范围、高精度的传感器和一个大范围、低精度的传感器建立相关关系,再用大范围、低精度的传感器测定研究区平均降雨量 | 可用地面测量信息与卫星可见光和热红外数据结合来估测空间降雨分布 |
| 微波辐射法    | 又称被动微波技术。在某些微波频率范围内,云石透明的,而且微波辐射与雨滴大小直接相关。                 | 主要有两种方法:通过散发/吸收、通过散射            |

两种遥感测雨都处在不断完善的阶段,且雷达测雨较为成熟。利用微波技术对空间尺度为 0.5°~1°范围内的连续降雨的估算相关性可达 0.7 以上;利用红外或可见光遥感数据,对空间尺度为 2°~5°的气候尺度,时间尺度为周或月,在热带和亚热带地区中纬度的暖季,对流降水估算可达 0.8 以上<sup>[14-15]</sup>。

2.2 陆面蒸散发反演

陆面蒸散发数据的遥感获取途径主要依靠间接的下垫面参数因子,用经验方程式或物理数学模型来估算蒸散发量。基于不同时相的遥感数据可以绘制土壤蒸散发的年内分配和不同气候条件下的土壤蒸散发图。但由于植被、土壤、气候等参数难以收集,所以应用模型时应简化变量和条件。利用遥感技术估算陆面蒸发的基本依据是能量平衡方程,即:

$$R_n + G + H + LE = 0 \tag{1}$$

式中: $R_n$  为净辐射; $G$  为土壤热通量; $H$  为显热通量; $LE$  为潜热通量。

$R_n$  可通过天文辐射(理论太阳辐射)用经验公式求得,亦可通过遥感方法求得。 $G$  可通过将土壤划分为若干层的数值模型进行求解。目前区分  $H$  和  $LE$  的方法主要有 3 大类<sup>[16]</sup>: ①经验、半经验公式;②有物理基础的分析模型;③数值模型。

进行蒸散发遥感反演的遥感数据主要是热红外遥感资料和微波遥感资料。同热红外遥感资料相比,由于微波遥感受到大气和云的影响较少,并且可以获取不同深度的土壤信息(Jackson et al. 1995),因而在蒸发的估算领域被广泛采用。利用遥感资料

估算区域蒸发量还存在着诸如经验或半经验公式、受时间和空间分辨率影响等问题,结合地面气象和植被要素的遥感数据反演陆面蒸发通量是估算蒸散发的有效手段。

国内陆面蒸散发遥感反演起步较晚。陈云浩等<sup>[17]</sup>结合植被覆盖度数据,给出非均匀陆面条件下的区域蒸散计算方法,并应用到我国北方地区,精度较高;李红军等<sup>[18]</sup>基于 Landsat7 ETM + 数据,利用 SEBAL 模型对河北省栾城县进行了遥感蒸散研究,计算获得地面特征参数与日蒸散量,模拟结果较为合理;李星敏等<sup>[19]</sup>基于遥感技术对区域农田蒸散过程进行研究,结果证实遥感技术在区域蒸散发的估算方面具有其他方法不可比拟的优势。

2.3 河川径流反演

目前,由于任何遥感仪器或手段均不能直接测量河川径流,所以一般通过遥感资料间接估算河川径流量。遥感技术在径流计算中的应用分为两种<sup>[2]</sup>:

(1)结合下垫面资料,利用遥感手段分别计算(或辅助计算)降水、蒸散发、土壤含水量、地形坡度等水文循环项,然后根据区域水量平衡方程反算得到径流项。如欧洲用 GMS 卫星遥感技术推算 Danube 河流的径流量,潘剑君<sup>[20]</sup>利用遥感技术和地理信息系统对泰国青迈省 Mae Rim 流域进行洪水模拟研究。

(2)与各种水文模型结合,包括松散结合和紧密结合两种方式。这类模型可分为两种情况<sup>[14-15]</sup>: 一是作为水文模型的输入与模型参数的估计;二是

发展新的遥感水文模型,这类模型主要是指分布式水文模型。此类模型主要将研究区分成若干子流域,并细分如水文响应单元,通过模拟各水文响应单元的水文特征,将水文参数与水文模型进行耦合。Behera 和 Panda<sup>[21]</sup>基于 SWAT 模型,利用气象、地形图、土壤图、土地利用和卫星影像提供的遥感数据,对亚湿润亚热带地区农业流域的管理措施进行评估研究,结果表明模型对日径流量、产沙量以及径流中的营养物浓度的在整个雨季模拟结果较好。魏文秋等<sup>[22]</sup>通过改进 SCS(Soil Conservation Services,美国水土保持局研制的小流域暴雨径流估算模型)模型并应用遥感资料确定模型的土地利用和土壤类型,在安徽城西径流试验站进行实例研究,结果表明产流模拟精度令人满意。

## 2.4 陆面温度反演

陆面温度(Land Surface Temperature, LST, 又称地表温度、地面温度等)影响海陆水循环之间的能量交换,是分布式水文模型重要参数之一。目前获取陆面温度的方法主要有3种:利用城市和乡村的历年气候资料;通过布点观测;利用航片、卫片资料。其中利用航片、卫片资料测温在大尺度和测站分布均匀性地区具有优越性。

陆地表面的情况与相对均一的海面相比更为复杂,陆地表面地物类型变化很大,如作物覆盖地区与休耕地温度差别明显;同时,LST在一天内的循环变化的物理机制十分复杂。由于海面温度反演较陆面温度反演更为容易,故人们对地球温度反演研究始于海洋。20世纪60年代末,人们开始利用卫星热红外波段测量海面温度。随着遥感技术的发展、卫星数据质量的不断提高,利用气象卫星资料(如NOAA/AVHRR<sup>[23]</sup>、GMS等)反演海面温度的技术日趋成熟,在一定程度上带动了陆面温度反演研究。LST是SST研究的继承和发展,LST反演是当前遥感领域研究的热点之一。

用于遥感反演陆面温度的遥感信息源主要有:NOAA/AVHRR的第4、5通道<sup>[24]</sup>,TM/ETM的第6波段,MODIS的第6波段。目前的反演方法较多,主要有劈窗算法、单窗口法、热辐射传输方程法、多通道法等<sup>[25]</sup>。其中劈窗算法较为简便,应用也最为广泛。国内外学者对NOAA/AVHRR通道4/5、EOS/MODIS通道31/32、GMSS/VISSR的两个红外通道等反演陆面温度的劈窗算法都有研究。由于NOAA/AVHRR数据获取较为容易,NOAA/AVHRR通道4/5反演陆面温度的劈窗算法研究最为广泛,

主要采用普朗克函数进行陆面亮温反演。反演使用的遥感数据空间分辨率较低且热红外波段较少,一般在下垫面复杂情况下进行的路面温度反演计算误差较大。

## 2.5 土壤水分反演

土壤水分是分布式水文模型参数化过程中的一个关键变量。传统的土壤水分监测基于点位观测,费时费力、观测点分布稀少、无法实现大范围土壤水分实时动态监测。随着遥感技术发展,大范围土壤水分实时动态监测成为可能。国外利用遥感技术进行土壤水分监测的可行性研究始于20世纪60年代末。70年代后,土壤水分遥感监测应用研究逐步开展起来。我国开展土壤水分遥感监测试验研究大体从80年代中期起步。

目前国内外用遥感技术监测土壤水分的方法很多,主要方法有<sup>[26-28]</sup>:能量平衡法和微波遥感方法、热惯量模式(热红外方法)、土壤水分光谱法、气象法、植被水分生理法等。

在土壤水分监测中,多数学者青睐于利用热红外与微波遥感手段进行土壤水分监测。依据土壤水分平衡及热量平衡原理,通过地表热通量方程及地表能量平衡边界条件,从遥感成像机理出发,运用热红外遥感的土壤热通量、植物蒸散、作物缺水指数等方法,以及微波遥感的土壤辐射亮温、土壤介电常数与土壤水分的关系等,建立遥感数据与地面测量值间的经验/半经验统计回归模型、数值模拟方程(如水热耦合传输方程)等,并借助GIS的支持,通过引入辅助参数,以提高遥感土壤水分、旱情监测的精度和时效。

微波具有全天候、高精度等特点,是未来土壤水分遥感监测的主要方式。微波遥感计算土壤含水量有被动微波法和主动微波法两种<sup>[29]</sup>。对于被动微波法,在植被覆盖区,微波辐射测量土壤湿度的有效采样深度为2~5 cm,且选择较长波长更具优越性;对于主动微波法,以应用X波段侧视雷达为主,方法主要是后向散射系数法。因为土壤含水量多少直接影响土壤的介电特性,雷达回波对土壤湿度极为敏感。对雷达发出的微波信号,不同介电常数的物体,回波信号不同,即不同含水量土壤的微波后向散射系数不同,通过建立二者的关系,达到监测旱情的目的。

## 2.6 土地利用/土地覆盖信息提取

人类对土地的利用导致土地覆被变化,而土地覆被状况与近地表面的蒸散发、截留、填洼、下渗、产汇流等诸多水文过程密切相关。因此,土地利用的

变化影响到流域水文过程的各方面。《土地利用现状分类 GB/T 21010 - 2007》国家标准采用一级、二级两个层次的分类体系,共分 12 个一级类、56 个二级类。其中一级类包括:耕地、园地、林地、草地、商服用地、工矿仓储用地、住宅用地、公共管理与公共服务用地、特殊用地、交通运输用地、水域及水利设施用地、其他土地。水文模拟根据不同土地利用类型的属性特征,设置与之相应的水文模型参数,对水文循环过程进行模拟。

不同地物的光谱特征差异是土地利用类型信息遥感解译的基础。土地利用类型解译首先对遥感数据进行预处理,通过遥感解译和野外调查相结合,建立遥感解译知识库,以各类地物的解译知识库为标注,分层分类提取土地利用类型信息。利用野外调查验证遥感解译精度,符合要求的解译结果纳入土地利用成果数据。当前,我国国土及其他部门已普遍采用遥感影像进行土地利用调查,土地利用遥感调查技术已较为成熟。

2.7 叶面积指数反演

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是单位土地面积上植物的总叶面积。叶面积指数越大,叶片交错重叠程度越大,它是一个反映地表植被分布和冠层结构的重要生态参数,是分布式水文模型的主要参数之一。在分布式水文模型中,通过引入叶面积指数,可以计算植被对降水的截留和冠层蒸散发。大面积获取叶面积指数是比较困难的,遥感技术为大范围叶面积指数的测量提供了条件<sup>[30-31]</sup>。当前

遥感定量研究叶面积指数(LAI)的两种主要方法<sup>[32-33]</sup>:统计模型法和光学模型反演法。

统计模型法是基于植被的光谱特征与地表其它因子的光学特性存在很大差别,利用遥感定量统计分析叶面积指数<sup>[34-35]</sup>。统计分析法以 LAI 为因变量,以光谱数据或其变换形式(例如植被指数)作为自变量建立的估算模型,即  $LAI = f(x)$ ,  $x$  为光谱反射率或植被指数。浦瑞良、宫鹏等<sup>[36-37]</sup>先后使用三类模型技术(单变量回归,多变量回归和基于植被指数(VI)的 LAI 估计模型)研究小型航空光谱制图成像仪(CASI)数据,用以估计针叶林叶面积指数。结果说明利用 CASI 二种成像方式(高光谱和多光谱)得到的数据对于 LAI 估计具有相似的效率。与其它两种技术比,逐步回归方法导致较高的 LAI 预测精度。在单变量回归和 VI 基础法中使用 NDVI,比起其它形式的 CASI 数据能产生较好的效果。

光学模型法作为基于植被双向反射率的分布函数(Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF),是建立在辐射传输模型基础上的一种模型。该方法具有相当强的物理基础,与植被覆盖类型或环境状况无关。目前相对成熟的是基于物理光学基础的光学模型。用于反演 LAI 的光学模型比较多,主要有 Verhoef<sup>[38]</sup>的 SAIL(任意倾斜叶子散射模型)。该模型简化了冠层结构,降低了输入参数的要求,只需叶子的反射率和透射率、背景土壤的光学特性、LAI、平均叶子倾斜角度和太阳入射漫辐射分量即可。

表 3 统计模型法与光学模型反演法对照表

| 方法      | 原理                            | 类别   | 模型函数                            | 代表模型                                            | 优点   |
|---------|-------------------------------|------|---------------------------------|-------------------------------------------------|------|
| 统计模型法   | 植被冠层的光谱特征与地表其它因子的光学特性存在很大差别   | 经验模型 | $LAI = f(x)$<br>$x$ 为光谱反射率或植被指数 | 单变量回归、多变量回归、基于植被指数的估计模型等                        | 形式灵活 |
| 光学模型反演法 | 植被的非朗伯体性(植被对太阳光短波辐射的散射具有各向异性) | 定量模型 | 双向反射率分布函数(BRDF)                 | Verhoef 的 SAIL(任意倾斜叶子散射模型)、Li Strahler 的几何光学模型等 | 普适性  |

3 存在问题分析

遥感技术在分布式水文模型中得到广泛应用,应用过程中所需参变量的反演方法日趋完善。但受到遥感技术自身局限性的制约,应用过程中尚具有如下问题:

(1)难以满足水文模拟尺度问题。水文模型的

模拟内容涉及到水文循环的各过程。针对不同尺度的水文过程,选取与之时空尺度相应的遥感影像,是解决遥感与水文模拟耦合发展的关键。

(2)遥感数据的精度偏低。虽然遥感技术在很多学科得到了广泛应用,但由于缺乏详尽的辅助资料,遥感影像的精度定标和大气校正非常困难,影像的精度会产生一定的偏差,这个偏差可能将在未来

一段时间内一直存在。

(3) 现行的遥感数据提取水文变量方法应用范围较窄,缺乏普适性。当前遥感技术的应用大多仅停留在把研究需要的水文模型参数信息简单解译出来,未能在深层次挖掘变量内涵间的联系,建立参变量反演方法的信息评估体系。基础资料解译结果通用性较差,难以实现同一参数间的横向比较。

(4) 遥感数据参数化和特征值提取方法尚不完善。流域下垫面高度的空间异质性,导致大多数遥感数据获取的水文属性参数与物理观测值间相关性较差。在模型构建过程中,数据的分辨率、误差和参数提取方法都直接影响参数化的结果,不同分辨率下的水文过程模拟结果不尽相同,在选择空间基础数据和参数化、流域离散方式及水文模拟方法之间的不确定性有待深入研究和探讨<sup>[39]</sup>。

## 4 结 语

随着遥感应用技术的进步和数据精度的提高,遥感数据已成为分布式水文模型不可或缺的数据来源。遥感技术不仅能够为分布式水文模型提供DEM、土地利用、植被状况、雪盖等空间信息,而且还能够利用遥感手段获取降雨时空分布信息、遥测水位和水面变化、反演蒸散发和土壤水等水文信息,极大地丰富了水文模型基础数据获取的手段,弥补了分布式模型对空间数据的需求<sup>[40]</sup>。

遥感为分布式水文模型的构建提供了丰富的空间数据,是及时、快捷获取大面积综合水文信息的有效手段。随着遥感技术和水文模拟的深入研究,基于遥感技术的分布式水文模型是水文模型发展的必然。水文-遥感耦合模型将成为实现流域水文过程模拟的主要途径之一,是构建气候变化、污染防治、灾害监测等水文模拟模型的基础。成熟的水文-遥感耦合模型应用前景广泛。

## 参考文献:

- [1] Philip A Townsend, Stephen J Walsh. Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing[J]. *Geomorphology*, 1998, 21(3-4): 295-312.
- [2] 贾仰文,王浩,倪广恒,等. 分布式路遇水文模型原理与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [3] Engman E T. Remote sensing based continuous hydrologic modeling [J]. *Advances in Space Research*, 1984, 4(11): 201-209.
- [4] Trochde F P, Troch P A, SU Z, et al. Application of re-

mote sensing for hydrological modelling [M]. In: *Distributed Hydrological Modelling*, Abbott, M. B. and Refsgaard, J. C. (Eds). Kluwer Academic Publishers, 1996: 165-191.

- [5] LI Jiren. Application of remote sensing and geographic information system in research of distributed hydrological model [J]. *Hydrology*, 1997(3): 8-12.
- [6] 何延波,杨 琨. 遥感和地理信息系统在水文模型中的应用[J]. *地质地球化学*, 1999, 27(2): 99-103.
- [7] 王光谦,刘家宏. 数字流域模型[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [8] 刘昌明,郑红星,王中根,等. 流域水循环分布式模型[M]. 郑州:黄河水利出版社,2006.
- [9] 张文明,董增川,钱 蔚,等. 遥感技术在水文水资源领域中的应用研究进展[J]. *节水灌溉*, 2007(8): 24-32.
- [10] 陈 乾,扬兰芳,韩 涛. 用GMS卫星资料反演复杂地形下的降水率[J]. *水科学进展*, 1997, 8(4): 353-358.
- [11] 王建华. 年尺度下的黄河流域降水遥感反演[J]. *资源科学*, 2003, 25(6): 8-13.
- [12] 陈利群,刘昌明,杨胜天,等. 黄河源区降水遥感反演[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(B07): 87-91.
- [13] 王华荣,朱小祥,徐会明,等. 基于FY-2C卫星资料估算四川地面降水方法研究[J]. *气象*, 2008(8): 29-34.
- [14] 傅国斌,刘昌明. 遥感技术在水文学中的应用与研究进展[J]. *水科学进展*, 2001, 12(4): 547-559.
- [15] 毕华兴,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.
- [16] Chen J M, Chen X Y, Ju W M. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 305: 15-39.
- [17] 陈云浩,李晓兵,史培军. 非均匀陆面条件下区域蒸散量计算的遥感模型[J]. *气象学报*, 2002, 60(4): 508-512.
- [18] 李红军,雷玉平,郑 力. 等. SEBAL模型及其在区域蒸散研究中的应用[J]. *遥感技术与应*, 2005, 20(3): 321-325.
- [19] 李星敏,卢 玲,杨文峰. 遥感技术在区域农田蒸散研究中的应用[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(8): 161-170.
- [20] 潘剑君. 遥感技术对流域水文特征及其径流的定量研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(3): 88-92.
- [21] Behera S, Panda R K. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2006, 113: 62-72.
- [22] 魏文秋,谢淑琴. 遥感资料在SCS模型产流计算中的应用[J]. *环境遥感*, 1992, 7(4): 243-250.
- [23] Kerr Y H, Lagouarde J P, Imbernon J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm [J]. *Remote Sensing*

- of Environment, 1992(41):197-209.
- [24] 尹楠. NOAA/AVHRR 的分裂窗算法在地表温度反演中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(4):8-11.
- [25] 刘含海, 钱乐祥, 李爽. 基于 RS 的陆面温度反演研究进展[J]. 平顶山学院学报, 2007, 22(2):118-122.
- [26] 陈怀亮, 毛留喜, 冯定原. 遥感监测土壤水分的理论、方法及研究进展[J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(2):55-65.
- [27] 汪潇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 遥感监测土壤水分研究综述[J]. 土壤学报, 2007, 44(1):157-163.
- [28] 肖国杰, 李国春. 遥感方法进行土壤水分监测的现状与进展[J]. 西北农业学报, 2006, 15(1):121-126.
- [29] 赵天杰, 张立新, 蒋玲梅, 等. 利用主被动微波数据联合反演土壤水分[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7):769-775.
- [30] Chen J M, Pavlic G, Brown L, et al. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 80:165-184.
- [31] 张晓阳, 李劲峰. 利用垂直植被指数推算作物叶面积系数的理论模式[J]. 遥感技术与应用, 1995, 10(3):13-18.
- [32] 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J]. 国土资源遥感, 2003(3):58-62.
- [33] 李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 等. 植被叶面积指数遥感监测模型[J]. 生态学报, 2005, 25(6):1491-1496.
- [34] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [35] 宫鹏, 史培军, 浦瑞良, 等. 对地观测技术与地球系统科学[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [36] 浦瑞良, 宫鹏, 约翰 R. 米勒. 用 CASI 遥感数据估计横跨美国俄勒冈州针叶林叶面积指数[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1993, 17(1):41-48.
- [37] Peng Gong, Ruiliang P U, Miller J R. Coniferous forest leaf area index estimation along the Oregon transect using compact airborne spectrographic imager data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1995, 61(9):1107-1117.
- [38] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling - the SAIL model[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16:125-141.
- [39] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: A review[J]. Hydrological Processes, 1995, 9(3-4):251-290.
- [40] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 2010, 41(9):1009-1017.

(上接第 173 页)

的水质基本达到地表水环境质量标准。但开丰桥、蜀山大桥监测站水体污染较为严重,水质评价结果为Ⅳ级以上,分析原因主要是工业发展带来排污量的继续增加;城市化建设使原来散布的生活污染向城镇集中,造成城市内河,流经城市河段的水质进一步恶化,应引起足够重视。

### 3 结 语

综合考虑影响水质因素的随机性、模糊不确定性及多样性等特点,采用了模糊综合评价法,分析结果表明,该方法操作简单,结果真实可靠,是一种比较适用的评价方法。通过对水质评价,可以有针对性制定江河治理方案。

#### 参考文献:

- [1] 秦天玲, 候佑泽, 郝彩莲, 等. 基于主成分分析法的武烈河流域水质评价研究[J]. 环境保护科学, 2011, 37(6):102-105.
- [2] 李俊, 卢文喜, 辛欣, 等. 判别分析法在饮用水源地水质评价中的应用[J]. 人民黄河, 2009, 31(2):43-44.
- [3] 郜慧, 金辉. 模糊综合评判法在沙坪河流域水质评价中的应用[J]. 人民珠江, 2005, 26(6):50-51.
- [4] 孟祥宇, 徐得潜. 流域水质评价模糊综合评判模型及其应用[J]. 环境保护科学, 2009, 35(2):92-93.
- [5] 陈守煜, 李亚伟. 基于模糊人工神经网络识别的水质评价模型[J]. 水科学进展, 2005, 16(1):88-91.
- [6] 李培月, 吴树宽. 基于模糊数学的内蒙古东胜煤田阿不亥普查区水质评价[J]. 水利科技与经济, 2009, 15(9):789-791.
- [7] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 长春:吉林大学出版社, 2002.
- [8] 王颖, 方航. 模糊识别法在水库水质评价中的应用[J]. 人民黄河, 2010, 32(7):40-41.
- [9] 史建静. 姚江水资源统一调配和保护设想[M]. 北京:北京水利水电出版社, 2005, 2.
- [10] 国家环境保护总局. GB3838-2002, 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2002, 4.