

# Advances in Application of Remote Sensing in Ecohydrological Modeling

Lajiao Chen, Lizhe Wang

Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing  
Email: chenlajiao@ceode.ac.cn

Received: Aug. 10<sup>th</sup>, 2012; revised: Aug. 31<sup>st</sup>, 2012; accepted: Sep. 7<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** Remote sensing, with advantages of short period, abundance information, low cost, plays an important role in ecohydrological modeling. This paper firstly introduces the characteristics of ecohydrological model and their requirement for remote sensing data. Then the paper provides a perspective on current state of application of remote sensing in eco-hydrological modeling. The key problems of the application of remote sensing in ecohydrological modeling are addressed (i.e., the complex issues of uncertainty, scale mismatching et al.) which may be solved by data assimilation. With the development of remote sensing technology, hyperspectral and multispectral image becomes more and more popular, which will expand the application of remote sensing in ecohydrological modeling.

**Keywords:** Remote Sensing; Eco-Hydrological Model; Application; Data Assimilation

## 遥感在生态水文模型中的应用进展

陈腊娇, 王力哲

中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京  
Email: chenlajiao@ceode.ac.cn

收稿日期: 2012年8月10日; 修回日期: 2012年8月31日; 录用日期: 2012年9月7日

**摘要:** 遥感数据具有周期短、信息量大和成本低的特点, 在生态水文模型中具有广泛的应用前景。本文从生态水文模型的概念出发, 阐述了将遥感技术应用于生态水文模型的必要性, 在此基础上总结了遥感在生态水文模型中的应用现状, 最后, 对遥感在流域生态水文模型应用中存在的关键问题(如遥感数据的不确定性、遥感的时空尺度与水文模型的不匹配、遥感数据与其他输入数据的空间尺度不兼容、模型参数估计与遥感数据同化)进行讨论。随着遥感技术的进步, 高光谱、多波段数据的不断涌现, 流域生态模拟的输入数据更加丰富和多样化, 数据同化技术作为多源数据的融合和集成的重要手段, 将极大推动遥感生态水文模型中的应用。

**关键词:** 遥感; 生态水文模型; 应用; 数据同化

### 1. 引言

遥感是通过不接触探测目标的情况下, 利用某种传感器装置在获取其特征信息, 并对这些信息进行提取、加工、表达和应用的一门综合技术。自 1960 年 E. L. Pruitt 提出以来, 遥感的发展迅速, 其作为一门技术已广泛应用于资源普查、灾害监测、作物估产等多个领域。遥感的探测范围可遍布全球, 具有周期短、

信息量大和成本低的特点, 是当代一种很重要的信息来源<sup>[1,2]</sup>。

遥感技术在生态水文模型的应用体现在遥感可以获得与生态水文过程相关的流域资料, 遥感技术可以提供土壤、植被、地形、土地利用和水系水体等许多有关下垫面条件的信息, 也可以测定估算蒸散发、土壤含水量和可能成为降雨的云中水汽含量<sup>[3]</sup>。遥感

技术在生态水文模型中的应用将极大推动生态水文模型的发展和应用。

## 2. 遥感在生态水文模型中的应用必要性

### 2.1. 生态水文模型

传统的水文模型，主要研究区域的降水、陆地表面蒸发、地表径流、土壤水分变化及其下渗等水分运动过程中的分配和反馈机制。随着生态水文学的兴起，生态水文过程的耦合研究日益重要，生态水文模型应运而生<sup>[4]</sup>。

生态水文模型是生态过程与水文过程的耦合模型，在模型计算中考虑林冠截留、植物蒸腾、土壤蒸发、入渗、地表径流、壤中流、植物生长等生态水文过程，并模拟植被与水的相互作用关系。生态水文模型主要侧重模拟水文过程对生态系统的结构和功能的影响以及生态过程对于水文过程的反馈作用<sup>[5]</sup>。生态水文模型的实现可以是在水文模型的基础上，融入植被的动态过程和生物地球化学过程，或者是在生态模型的基础上，考虑水分在植被或生态系统内的循环过程。

基于水文物理过程和植被生态过程的分布式生态水文耦合模型是目前生态水文模型开发的重点领域。目前应用的比较广的分布式生态水文模型主要有 SHE 模型，SWAT 模型、SWIMM 模型等。

### 2.2. 生态水文模型对数据的要求

生态水文过程具有显著时空异质性和尺度依赖性<sup>[6]</sup>，生态水文模型中许多变量的时空变化幅度非常大，也极为频繁，尤其是降水、蒸发数据，即使是在很小的尺度内，也会表现出很大的空间异质性。流域生态水文过程的模拟结果很大程度上依赖于输入数据的质量。而长期以来，传统的水文输入数据，大多为单点观测数据，如降水、蒸发的数据都来自于气象台站。有限的空间点位上的观测数据并不能真实反映实际的空间分布规律，即单点观测的数据并不能代表流域尺度的面状信息，用这种资料对生态水文过程进行模拟使得模拟结果的可靠程度受到很大的质疑<sup>[3]</sup>。

随着生态水文模型的发展，从最初的集总式发展到分布式的模型，其对输入的空间数据的要求也越来越高，用点状信息来代替面状信息的问题就显得尤为突出。传统集总式的模型把流域作为一个整体，不考

虑水文过程、输入变量的空间异质性，参数和变量都取的是流域的平均值，对空间数据的要求比较低，但其主要缺陷是假定集水区降水分布均匀或至少其空间分布保持不变，这种假定与实际是不符合的。针对这个问题，Freeze R.A.最早提出分布式的水文模型框架，成为生态水文模型中的一场革命<sup>[7]</sup>。分布式生态水文模型将流域离散成多个计算单元，以离散栅格的形式来体现流域特征和空间输入数据的空间变异性<sup>[8]</sup>。其优点是充分考虑水文生态要素的空间异质性，更加接近实际情况。但近年来分布式模型应用的经验<sup>[3]</sup>表明，即使用流量数据进行充分的率定，这些完全分布式模型仍不能完全提高模型的预测精度，其主要原因在于现有的生态水文输入数据不能满足模型计算的要求，没有足够多的高精度数据来定量流域参数的空间变异性，遥感技术正是解决该问题最有效的手段之一。

### 2.3. 遥感在生态水文模型应用中的优势

遥感技术为生态水文过程的定量模拟提供大量的数据源，其突出优势体现在能以不同的时空尺度提高多种地表特征信息。作为一种信息源，栅格格式的遥感数据与分布式生态水文模型的数据格式的一致性，给概念理解和使用上都带来了方便。遥感技术可以直接或间接地获取常规手段无法观测到的水文变量和参数，可以提供长期、动态和连续的大范围资料，以遥感为手段获取的上述信息在确定植被生长信息、流域产汇流特性等模型参数时是十分有用的<sup>[8]</sup>。因此，遥感技术在生态水文模型的应用中有着广泛的应用前景。

与传统的数据收集方法相比，遥感数据在生态水文模型中应用的优点可以归纳为以下几点<sup>[3]</sup>：1) 遥感技术获得的是面上观测数据而不是点上的观测数据，以区域的分布观测代替了点观测；2) 遥感的时空分辨率都比较高。航天微波遥感就是因为其较高的时空分辨率引起了学者们的兴趣；3) 可收集、存储同一地点不同时间的全部信息，即多时相信息，这使得遥感卫星数据具有实时性的特点，可以捕捉地表信息的动态变化，非常有利于水文过程的模拟；4) 数据不仅是可见光的信息，也可以是多光谱的信息，有利于利用与水文地质有关的谱段信息；5) 可获得遥远的、无人可及的偏僻区域的信息。

### 3. 遥感在生态水文模型中的主要应用

目前遥感在生态水文模型中的应用,在生态水文模型中的应用,体现在遥感可以为生态水文模型提供输入数据和关键参数。遥感在生态水文模型中的应用(图 1),大致可以分为两大类:一是直接应用,为模型准备输入数据,如应用遥感来反演降水量等。二是应用卫星遥感资料来推算生态水文过程相关的参数和变量,如推算植物地生物物理参数等。

当前利用遥感来反演流域的生态水文相关参数,国内外开展了不少的研究<sup>[9-13]</sup>,如 Anderson<sup>[9]</sup>介绍了用遥感数据在生态水文模型 MIKESHE 模型中测定土壤湿度、降雨和叶面积的方法,为其提供蒸散发、土壤水分等资料,研究 Senegal(塞内加尔)河流域的水文状况。O'Donnell 等<sup>[10]</sup>把遥感资料作为变量输入,在俄亥俄河流域上应用大尺度的 VIC(Variable Infiltration Capacity)模型进行有关水文要素的研究。许有鹏等<sup>[11]</sup>以浙江曹娥江流域为试验区,利用萨克拉门托模型,重点探讨了 Landsat T.M.影像数据直接或辅助确定水文模型参数的途径与方法。凌峰等<sup>[12]</sup>利用 SRTM 数据反演流域下垫面参数,并将其应用到分布式的生态水文模型 SWAT 模型和 TOPMODEL 中。下文就目前遥感在生态水文模型中应用比较广或是具有比较大的应用潜力的(如土壤水分的遥感反演)做简要的总结。

#### 3.1. 降水数据反演

遥感在降水资料获取方面,包括地面雷达、卫星可见光/红外线技术,其中应用比较广泛的是利用气象雷达获得降水的空间分布数据。雷达是微波遥感中的一种类型,其原理是利用大气中降水粒子对电磁波的

吸收和散射作用,通过对回波信号的分析处理,来确定来自空间采样体积中的降水例子的后向散射能量,再计算出实时地面降雨量<sup>[3]</sup>。雷达不能直接进行降水量的测量,而是通过对水汽凝结体的反射率进行测量。雷达在单点位置能较好地提供覆盖范围内降水的时空分布,但这些数据在输入生态水文模型之前,必须进行整理分析和全面的质量控制。雷达数据在大部分情况下,其模拟的精度还是可以接收的,可以应用于分布式生态水文模型中。目前雷达技术反演降水,主要应用于水文预报<sup>[14,15]</sup>,作为水文预报的输入数据,也用一些研究,在生态水文模型中的应用相对较少。

除了雷达数据外,也可以利用可见光和近红外遥感数据也可以进行降水反演,其原理主要是应用云层的顶部的辐射。如陈利群等基于遥感数据,分析了黄河河源区降水强度与云亮温、云反射率及云斜率参数的基础上,建立了黄河河源区基于 NOAA/AVHRR 资料估算的降水资料<sup>[16]</sup>。

#### 3.2. 蒸散发反演

蒸散发包括土壤蒸发和植被蒸腾两个方面,蒸散发的强弱与植物的光合作用、干物质积累和水资源的合理利用密切相关,它既是生态系统水量平衡的重要组成部分,也是流域生态水文模型的关键环节。传统的蒸散发计算,主要采取能量平衡法和物质传输法,对蒸散发计算局限于局地尺度,难以获取区域尺度的蒸散发<sup>[17]</sup>。对于区域尺度上蒸散发的估算,遥感技术具有得天独厚的优势。

遥感技术对蒸散发的估算,其主要原理是利用可见光、近红外和热红外波段的反射和辐射信息及其变化规律进行相关参数的反演,结合近地面的风速、温度、湿度信息,通过能量平衡方程,得出计算需要的参数和变量。国内外关于蒸散发的遥感估算研究已有不少<sup>[18,19]</sup>,针对不同的研究区和卫星遥感资料提出了众多基于遥感的蒸散发模型,李小文<sup>[2]</sup>把遥感估算蒸散发模型分为三类:平衡余项法,SEBAL 模型和 SEBS 模型,其中 SEBAL 模型由于其所需辅助参数较少、估算精度较高,得到国内外学者的认可,被广泛应用于世界各地不同的气候条件下的国家和地区。

遥感反演蒸散发在生态水文模型中应用研究比较多,陈镜明<sup>[20]</sup>等在分布式的生态水文模型 DHSVM

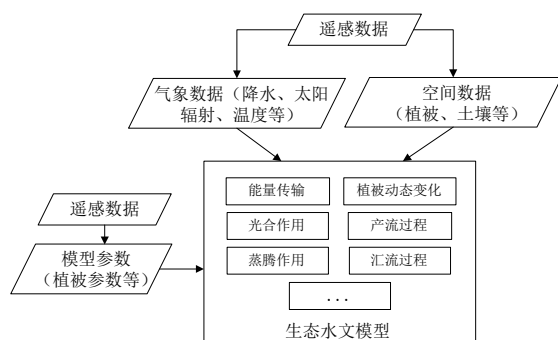


Figure 1. Application of remote sensing in ecohydrological model  
图 1. 遥感在生态水文模型中的应用示意图

的基础上, 利用遥感来反演蒸散发作为输入, 获得区域的蒸散发分布; 何玲和莫兴国等<sup>[21]</sup>利用 MODIS 数据反演计算了无定河流域的日蒸散发量, 林三超和张万昌等<sup>[22]</sup>利用改进的 DHSVM 模型结合 TM 数据对汉江上游的蒸散发空间分布。

### 3.3. 土壤含水量的反演计算

土壤含水量是生态水文过程中的重要部分, 它直接控制着地表水量和能量平衡, 是生态水文模拟中的一个重要状态变量。由于传统的方法在测量连续分布的土壤含水量极为困难, 土壤含水量并没有广泛直接地应用到生态水文模型中。而遥感可以用于测量各种地形和地表覆盖的地表土壤含水量。

遥感计算土壤含水量的原理主要根据土壤表面发射或反射电磁辐射能的测量。土壤水分特性在不同波段有不同的反映, 可以根据土壤的物理特性与其辐射理论, 利用可见光 - 近红外 - 热红外 - 微波等不同波段的遥感资料, 与环境要素进行相关分析, 来监测土壤水分的变化<sup>[17]</sup>。

利用遥感来计算土壤含水量, 从遥感光谱波段的使用, 主要分为两大类<sup>[23]</sup>。第一类方法是光学遥感方法监测土壤含水量, 比较成熟的方法主要有: 1) 热惯量法<sup>[24]</sup>。最早由 Watson 等提出, 利用热红外遥感影像反演下垫面温度, 建立与土壤热惯量、土壤水分含量的关系模型。2) 植被指数法<sup>[25]</sup>。其原理是认为植被的缺水状况可以通过不同的遥感植被指数来表征, 通过植被指数间接估算土壤水分。一般来说, 土壤水分供应好, 植被生长状态好, 植被指数与土壤含水之间呈正相关。3) 作物缺水指数法<sup>[26]</sup>。作物缺水指数(Crop Water Stress Index, CWSI)是土壤水分的一个度量指标, 是利用热红外遥感温度和常规气象资料来间接监测植被条件下的土壤水分, 是遥感监测土壤水分的一种重要方法。

第二类是微波遥感监测土壤水分。由于微波对云层有较强的穿透力, 不受光照条件限制, 可以全天候工作, 使得微波遥感在土壤水分监测中具有独特优越性, 这是遥感监测土壤水分最有希望的方法, 但其成本很高, 目前尚未进入实用阶段。

### 3.4. 植被参数的反演

生态水文模型显著的特点之一是将植物的生长

状况融入水文模型中, 植物生长状况的模拟是生态水文模型中生态模块的重要部分, 因此, 应用遥感来反演地表植被参数是遥应用于生态水文模型的重要内容。

#### 3.4.1. 植被指数

由于植被对于光谱反映敏感, 叶绿素能够大量吸收红光辐射, 同时对于近红外存在显著的发射效果, 所以, 常用遥感计算植被指数再来反演植物的生物物理参数, 其中使用最多的是比值植被指数(SVI)和归一化植被指数(NDVI)。

植被指数在生态水文模型中的重要作用体现在, 一方面, 植被指数是植物状态信息的表达, 是生态水文模型的重要输入参数之一; 另一方面, 植被指数与生物物理参数, 如叶面积指数 LAI, 植被覆盖度, 光合作用有效吸收辐射分量 FPAR 之间存在显著相关关系, 因此, 可以作为提取植被生物物理参数的“中间变量”。

#### 3.4.2. 叶面积指数(LAI)

叶面积指数 LAI 是生态水文模型的重要参数, 在很多的生态水文模型中, LAI 是必需的输入参数。叶面积指数表征植被冠层结构的基本参量, 它直接控制生态水文过程中植物的光合作用, 水分的蒸发蒸腾, 冠层截留, 地表枯枝落叶层<sup>[27]</sup>。此外, 叶面积的动态变化, 如季节变化, 对于植物生长动态模拟和水文过程的模拟是非常重要的。LAI 的地面测量费时费力, 而且只能获得小地块的 LAI 数据。遥感数据的大面积和时间序列的重复观测的特点为实现时间序列上大面积的 LAI 估算提供了有效的数据源。

遥感在叶面积估指数算中的应用, 可归纳为两大类: 统计模型法和光学模型法。统计模型法是以 LAI 为因变量, 以光谱数据或植被指数作为自变量建立的估算模型, 即  $LAI = f(x)$ 。其中,  $x$  为光谱反射率或植被指数。国内外大量的研究<sup>[28]</sup>关注植被指数与 LAI 的相关关系, 从而推算叶面积指数。统计模型形式灵活, 但属于经验性, 对于不同的数据需要重新拟合参数, 模型需要不断地调整, 因此许多的学者致力于研究出具有普适性的 LAI 定量模型。目前, 相对成熟的是基于物理光学基础的光学模型, 其建模基础是植被的非朗伯体特性, 用双向反射率分布函数(BRDF)来定

量表示。近年来,随着遥感技术的发展,高光谱技术被广泛应用于叶面积指数的研究<sup>[29]</sup>。由于高光谱数据具有波段窄且波谱连续的特点,因此可以构建许多对 LAI 相对敏感的植被指数。

### 3.4.3. 光合有效辐射分量(FPAR)

在生态水文模型中,对于植物生长的模拟,都要涉及到植被有效光合辐射的计算。绿色植物冠层吸收的光合有效辐射直接与光合作用相连,光合有效辐射(PAR)、植物吸收光合有效辐射(APAR)及植物吸收光合有效辐射分量(FPAR)三者间的数学关系为:  $APAR = FPAR \times PAR$ 。其中 APAR 不容易直接测量, FPAR 可以通过遥感数据进行反演,在生态水文模型中用来模拟植被的生产力。

国内外大量的研究表明<sup>[30,31]</sup>, FPAR 与植被指数之间也存在显著的相关关系,归一化指数 NDVI 之间存在近似线性的关系,这就可以根据遥感提取的植被指数来进行 FPAR 的反演。FPAR 的估算主要采用的光谱植被指数的遥感模型,其主要的遥感数据源是 AVHRR、MODIS 和 TM 数据。

## 4. 现存的关键问题

尽管目前遥感技术可以为生态水文模型研究和应用提供大量有关资料,但在应用上受传感器时空分辨率不能统一以及解译图像精度等影响,很多数据资料还不能被直接利用、充分利用。同时,由于生态水文过程和尺度问题的复杂性,也对遥感数据在生态水文模型中的应用产生了一定的阻碍。

### 4.1. 遥感数据的不确定性

遥感数据的成像过程,经历了从辐射源穿过大气层到达地面,再穿过大气层最后到达探测器的过程,每一个环节都涉及无穷多的参数,加上数据处理方法和遥感模型精度的影响,遥感数据受到诸多不确定性因素的影响。另一方面,遥感数据的反演算法将不确定性引入地表特征参数,对利用这些数据进行生态水文过程模拟将带来很大的影响<sup>[17]</sup>。

### 4.2. 遥感的时空尺度与水文模型的不匹配

遥感是在瞬时或很短的时间内获得地表信息,通过这些信息反演的地表参数也应该是瞬时量,无论是

长期定点观测数据或者遥感直接反演的数据都是瞬时值,而生态水文过程无论是时间上还是空间上,都是连续的<sup>[32]</sup>。在生态水文模型模拟过程中,需要的参数往往是小时、日时间尺度的。这就需把遥感数据在时空尺度上延拓。以蒸发为例,传统的方法常采用统计经验法与地表能量平衡余项法通常利用比值法或积分法将瞬时值延拓到全天值。但是,这两种延拓方法的假设条件,只有在晴天条件下才能满足:在瞬时蒸散变化比较大的多云或大风的天气下,这些延拓方法会产生很大的误差。

### 4.3. 遥感数据与其他空间数据的尺度不兼容

由于目前遥感数据的应用并没有渗透到生态水文模拟的各个方面,生态模型输入要素的空间信息很大部分还是来源于常规数据。常规的空间数据主要是通过地面观测或采样获得,而遥感数据,尤其是高空间分辨率遥感数据,与用于刻画其他生态要素的空间数据往往在空间尺度上是不一样的(即不兼容的),这种不兼容性严重影响到对生态要素空间协同变化的正确刻画,将在生态水文模型的模拟过程中引入错误的空间协同变化信息,以致造成生态水文模拟结果的严重偏差。Zhu 等<sup>[33]</sup>发现,分辨率低的土壤数据,其与遥感数据获得的精细空间数据,由于空间尺度的不匹配,其对空间要素的协同关系刻画是错误的,将这些数据输入 RHESys 模型时发现模拟结果存在很大的误差。Quinn 等<sup>[34]</sup>通过数据不兼容性对生态模拟影响的尺度效应的研究,发现当模拟尺度与要素中空间尺度最粗的数据的空间尺度接近时,数据不兼容性对模拟的结果影响最小。因此,当存在数据不匹配时,通常是将数据向粗的尺度转换,通过栅格数据重采样的等方法实现。

### 4.4. 模型参数估计与遥感数据同化

流域生态水文模型包括对水文过程、植物生理生态过程如光合作用、呼吸作用等多个过程的模拟,对各个过程的定量刻画涉及大量水文参数和生物物理参数,在分布式模拟的框架下,如何获取空间异质的模型参数是生态水文模型区域应用的瓶颈问题。遥感技术能反演和提取区域的地面物理参数和植被生物物理参数,但如上文所述,仅仅依靠遥感观测数据势

必在模型参数估算中引入了很大程度的不确定性。为最大限度地利用易获取的遥感数据,减小参数估算的误差,近年来数据同化开始活跃于模型参数估算中。

数据同化的基本含义是通过数值模型与观测数据相结合来提高所研究系统状态的模拟和预报能力,能够融合不同来源与不同分辨率的直接或间接观测,一定程度上提高生态水文模型模拟的准确度,成为一种集成多源地理空间数据的新方法。目前,在应用遥感进行流域生态水文过程模拟中,数据同化的应用已有不少的研究开展。如 Oliso 等<sup>[35]</sup>成功同化中等分辨率 MODIS 高光谱遥感数据到作物生长模型和 SVAT 模型中,对土壤水分蒸发蒸腾损失总量进行了连续监测。Konstantin 等<sup>[36]</sup>利用集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman filter)算法将 MODIS 的数据同化到 VIC 模型中,研究表明集合卡尔曼滤波算法是一种有效可行的同化算法,能够不断更新积雪覆盖程度模型的预测值,使其更加接近实际观测值;并与微波遥感数据 AMSR-E 反演的积雪覆盖程度结果进行比较,发现直接反演的数据存在比较大的误差。随着遥感技术的进步,高光谱、多波段数据的不断增多,流域生态模拟的输入数据更加多样化,迫切需要数据同化技术来实现多源、多分辨率空间数据的融合、集成和尺度推绎等,因此,在未来生态水文模型的应用研究中,数据同化技术将是实现数据融合、集成和有效使用的非常有效的手段,将具有广阔的应用前景。

## 5. 结论

由于遥感数据具有分布式特点,可以提供面状信息而非点状信息,直接或间接测量常规手段无法测量到的生态水文变量和参数(如区域土壤湿度),因此在生态水文模型的应用中有着广泛的应用前景。但由于遥感数据的自身存在不确定性,遥感数据的时空分辨率与生态水文过程尺度不匹配等问题的存在,限制了遥感的应用。

数据同化通过数值模型与观测数据相结合来提高所研究系统状态的模拟和预报能力,能够很好地解决观测值与模型模拟结果的集成和融合问题,一定程度上提高生态水文模型模拟的准确度,成为一种集成多源地理空间数据的新方法。目前在应用遥感进行流域生态水文过程模拟中,数据同化的应用已开展积极探索<sup>[35-37]</sup>。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈述彭. 地球信息科学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 李小文. 遥感原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] M. B. Abbott, J. C. Refsgaard. 分布式水文模型[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [4] J. B. Andrew, L. W. Robert. 生态水文学[M]. 北京: 海军出版社, 2002.
- [5] 王根绪, 刘桂民, 常娟. 流域尺度生态水文研究评述[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 892-903.
- [6] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈立项. 生态水文过程研究进展[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 580-587.
- [7] R. A. Freeze, R. L. Harlan. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*, 1969, 9(3): 237-258.
- [8] 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.
- [9] W. Mauser, S. Sehadlich. Modelling the spatial distribution of evapotranspiration on different scales using remote sensing data. *Hydrology*, 1998, 212-213: 250-256.
- [10] G. M. O'Donnell, K. P. Czajkowski, R. O. Dubayah, et al. Macro-scale hydrological modeling using remotely sensed inputs: Application to the Ohio River basin. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2001, 105(D10): 12499-12516.
- [11] 许有鹏, 陈钦峦, 朱静玉. 遥感信息在水文动态模拟中的应用[J]. 水科学进展, 1995, 6(2): 156-161.
- [12] 凌峰. 基于空间信息技术的流域分布式水文模型研究[D]. 华中科技大学, 2006.
- [13] 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.
- [14] 李致家, 刘金涛, 葛文忠等. 雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 601-606.
- [15] 王建华. 年尺度下黄河流域降水遥感反演[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 8-13.
- [16] 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, 126(7): 87-91.
- [17] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [18] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 516-528.
- [19] 刘朝顺. 区域尺度地表水热的遥感模拟及应用研究[D]. 南京信息工程大学, 2008.
- [20] J. M. Chen, X. Y. Chen and W. M. Ju. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. *Journal of Hydrology*, 2005, 305(1-4): 15-39.
- [21] 何玲, 莫兴国, 汪志农. 基于 MODIS 遥感数据计算无定河流域日蒸散[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 144-149.
- [22] 刘三超, 张万昌等. 分布式水文模型结合遥感研究地表蒸散发[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 354-358.
- [23] 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(6): 121-126.
- [24] 张仁华. 土壤含水量的热惯量模拟[J]. 科学通报, 1991, 36(12): 924-927.
- [25] F. N. Kogan. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91-100.
- [26] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟等. 用气象卫星监测土壤水分的实验研究[J]. 应用气象学报, 1994, 14(6): 736-739.
- [27] Chen, J. M. and J. Cihlar. Retrieving leaf area index for boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 153-162.
- [28] 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数的遥感定量方法综述[J]. 国土资源遥感, 2003, 3: 736-739.
- [29] 杨吉龙, 李家存, 杨德明等. 高光谱分辨率遥感在植被监测

- 中的应用综述[J]. 世界地质, 2001, 20(3): 307-312.
- [30] 吴炳芳, 曾源, 黄进良. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 585-590.
- [31] S. N. Goward, K. F. Huemrich. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: An assessment using the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39: 119-140.
- [32] 傅国斌, 李丽娟, 刘昌明. 遥感遥感水文应用中的尺度问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(6): 755-759.
- [33] A. X. Zhu, D. S. Mackay. Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling. *Journal of Hydrology*, 2001, 248(1-4): 54-77.
- [34] T. Quinn, A. X. Zhu and J. E. Burt. Effects of detailed soil spatial information on watershed modeling across different model scales. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7: 324-338.
- [35] 李新, 黄春林. 数据同化——一种集成多源地理空间数据的新思路[J]. 科技导报, 2004, 12: 13-16.
- [36] A. Olioso, Y. Inoue. Future directions for advanced evapotranspiration modeling: Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *Irrigation and Drainage Systems*, 2005, 19(3-4): 377-412.
- [37] K. M. Aandreadis, D. P. Lettenmaier. Assimilating remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model. *Advanced in Water Resources*, 2006, 29(6): 872-886.