

# 流域生态水文模型研究进展

陈腊娇<sup>1,2</sup>, 朱阿兴<sup>1,3</sup>, 秦承志<sup>1</sup>, 李润奎<sup>1,2</sup>, 刘京<sup>3</sup>, 刘军志<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 美国威斯康星大学麦迪逊分校地理系, 麦迪逊 53706)

**摘要:**流域生态水文模型是全球变化下流域生态水文响应研究的重要工具,通过定量刻画植被与水文过程的相互作用及全球变化对流域生态水文过程演变的影响机制,为流域水资源管理和生态恢复提供科学支撑,是生态水文研究的前沿和热点。基于植被与水文过程相互作用规律,流域生态水文模型一方面要充分描述植被与水文过程相互作用和互为反馈机制,另一方面要精确刻画流域的空间异质性。本文在分析流域尺度陆地植被与水文过程相互作用特点的基础上,将现有流域生态水文模型进行归纳和分类,剖析不同类型模型的优缺点,并总结现有模型应用的代表性研究成果,最后,对流域生态水文模型存在的关键问题(如植被与水文相互作用机制的描述、模型参数的估计、模拟结果的不确定性分析等)进行讨论。

**关键词:**流域生态水文模型;植被;水文过程;相互作用;全球变化

## 1 引言

在全球变化加剧水资源危机的背景下,传统的水文学研究难以解决流域出现的新问题,生态水文过程的耦合研究日益引起学者们的关注<sup>[1-6]</sup>。国际地圈生物圈计划及联合国教科文组织(UNESCO)国际水文计划(IHP)等都将陆地植被生态过程与水文过程的耦合研究作为核心内容<sup>[7]</sup>。1992年召开的国际水与环境会议<sup>[8]</sup>,首次将生态水文学作为一个独立的学科提出,其核心是在不同的时空尺度上揭示不同环境条件下植物与水的相互作用关系,为解决流域水资源危机和生态环境问题提供理论支持。Rodriguez-Iturbe<sup>[9]</sup>指出生态水文耦合研究将是21世纪水文学研究最前沿和最激动人心的创新领域。

流域生态水文模型是定量评估环境变化流域生态水文响应的重要工具<sup>[10-11]</sup>。通过定量刻画植被与水文过程的相互作用及全球变化对流域生态水文过程演变的影响机制,为流域水资源管理和生态恢复提供科学支撑。目前,国内外对流域生态水文模型已开展了一定深度的研究,并取得了一些阶段性成果。本文主要针对陆地生态系统的流域生态水文模型,在分析陆生植被与水文过程相互作用特点的基础上,将现有的生态水文模型进行了归纳和

分类,剖析不同类型模型的优缺点,并总结现有模型应用的代表性成果,最后,对流域生态水文模型存在的关键问题进行讨论。

## 2 流域植被与水文过程的相互作用

### 2.1 流域植被与水文过程相互作用机制

陆地植被生态过程(碳循环、植动态生长等)与水文过程通过各种物理和生物学过程发生交互作用,其密切联系和交互作用渗透到水、热、碳等物质和能量传输的各个环节(图1)<sup>[12-15]</sup>。

两者之间的相互作用主要体现在,一方面,水是植被生长的驱动力和制约因素,植物主要的生理过程,如光合作用、呼吸作用、养分循环,对水分限制具有高度敏感性<sup>[16-18]</sup>,水循环过程尤其是土壤水的时空变化决定了植被的生长动态、形态功能和空间分布格局<sup>[19]</sup>;另一方面,植被通过生物物理过程与生物化学循环作用于水循环过程,表现为:①植被通过根系吸水和蒸腾作用直接参与水循环过程;②植物冠层通过拦截降水,增大了蒸发量,减少到达地表的降水量,对降水进行了重新分配,如森林林冠的截留率占年降水量的20%~40%<sup>[15]</sup>;③植被枯枝落叶层提高了地表粗糙度,增加地表水下渗,

收稿日期:2011-01; 修订日期:2011-04.

基金项目:国家重点基础研究发展计划973项目(2007CB407207);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-442);资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目;国家自然科学基金项目(40971236)。

作者简介:陈腊娇(1982-),女,浙江乐清人,博士研究生,主要从事流域生态水文研究。E-mail: chenlj@lreis.ac.cn

减小洪峰流量,延长地表径流形成时间。

近年来的研究表明<sup>[20-22]</sup>,植被冠层气孔行为和土壤水运动是植被与水文相互作用中最为关键两大过程。由于植物光合作用与蒸腾作用同时受气孔行为的影响,形成光合作用-气孔行为-蒸腾作用耦合机制。植被冠层的气孔阻抗控制着植被与大气能量传输和湍流交换,决定了植被蒸腾作用。而植被冠层的气孔行为取决于叶内保卫细胞和叶表皮细胞的膨压变化,而膨压变化取决于从土壤到叶片的水分供应和叶片蒸腾失水之间的水分收支。土壤水运动又取决于地表的水循环过程,由此将大气过程、植被生态过程和水循环过程耦合在一起形成一个整体。

气候变化通过改变降水、温度等影响植被动态生长及植被结构与功能,进而影响水循环过程。同时,植被通过改变下垫面的基本特征(地表反照率、土壤湿度、地表粗糙度等)调节地气界面的能量交换影响水热过程,从而对气候系统产生作用<sup>[23]</sup>。例如,森林的砍伐会增加地面反射率,降低粗糙度,减弱植被对水文循环的调节作用,增加显热交换和地面温度。尽管人们早就意识到生态系统对气候有重要作用,但直到20世纪70年代后期才开始深入研究植被变化的气候响应<sup>[23]</sup>。Charney<sup>[24]</sup>最早注意到植被对气候的反馈机制,提出了生物-地球物理反馈机制。

鉴于气候、植被-水文过程之间互为反馈的复杂交互作用,若模拟过程中将任意一个过程进行静态化考虑,都可能因缺乏动态反馈造成模拟结果的严重偏差<sup>[25]</sup>,因此,在流域生态水文过程模拟中,需要动态刻画植被与水文过程相互作用的各个环节,力求接近真实情况,以准确预测环境变化对流域生态水文过程的影响。

## 2.2 流域植被与水文过程相互作用的空间异质性

受气候、地质条件、土壤和地形等自然条件的影响,植被与水文过程交互作用具有显著的空间异质性<sup>[9,14]</sup>。在较大的地理尺度上,气候是影响植被-水文相互作用最为重要的因子;在景观尺度上,地形、地貌影响小气候同时影响土壤的发育,控制了物质的再分配(水分、有机质等),尤其是土壤

水的空间差异,直接决定了植被生长状况的差异。在山区或丘陵区,森林生态和水文过程依赖于地形条件,地形的差异造成辐射、降水、温度条件和土壤水出现很大的空间变异性,植被冠层与局地土壤属性的紧密耦合与动态演变形成景观尺度上地貌、土壤、和植被的复杂空间格局。

因此,要合理描述流域尺度的植被-水文过程及其相互作用,需在空间上精确表达各环境要素的空间异质性,这就要求模型对流域的空间表达达到一定的精度,只有空间上分布式的模型才能充分体现流域空间单元的环境条件差异。

## 3 流域生态水文模型研究现状

传统的水文和生态模拟研究一直集中于建立单一模型,孤立地看待生态过程与水文过程。水文模型关注流域的产汇流等物理过程,很少或没有考虑植被的生物物理和生物化学过程<sup>[26]</sup>。生态模型则重点关注土壤-植被-大气连续体垂向机制,基本不考虑或者采用“水桶模型”简化处理土壤水运动,并且忽略水平方向上的侧向径流过程<sup>[14]</sup>。

流域生态水文模型的兴起一方面得益于地理信息技术、遥感等空间信息获取技术为流域过程模拟提供详细的流域下垫面条件的空间分布信息;另一方面流域分布式水文模型的出现,使得在各个空间单元上耦合田间尺度的生态模型成为可能。流域生态水文模型的起源有两大分支:①从水文模拟忽略植被的问题出发,在降雨-径流过程模拟中考

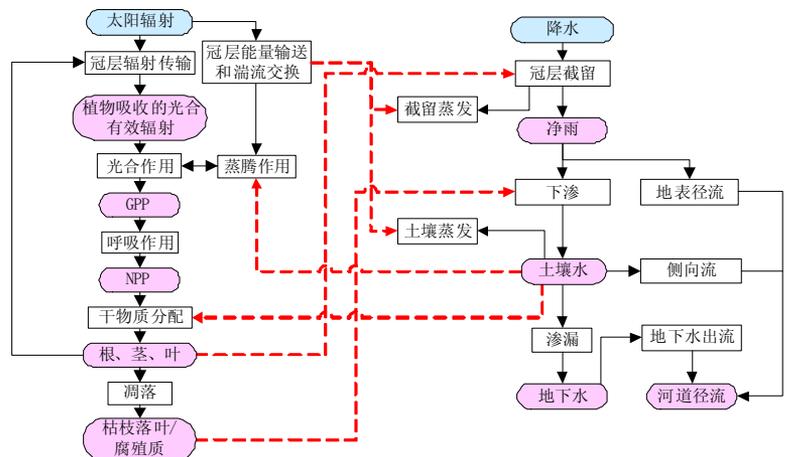


图1 植被-水文过程间的复杂交互作用

Fig.1 The complicated interactions between the processes of vegetation and hydrology

虑植被的物理和生物化学作用,主要包括植被蒸腾、根系吸水、冠层能量传输及CO<sub>2</sub>交换等过程的描述;②从植被生态过程模拟的角度出发,增加了垂向的土壤水运动和二维水文循环过程的模拟。

### 3.1 流域生态水文模型分类

目前,国内外对生态水文模型已开展了一定深度的研究,并取得了一些阶段性成果。根据不同的标准,流域生态水文模型有着不同的分类。以下按照模型中对流域植被与水文过程相互作用的描述,将现有模型归为两大类:①在水文模型中考虑植被的影响,但不模拟植被的动态变化,为单向耦合模型;②将植被生态模型嵌入到水文模型中,实现植被生态-水文交互作用模拟,为双向耦合模型。

#### 3.1.1 单向耦合模型

单向耦合模型,主要是从水文模拟的角度出发,显式地引入了植被层,在降雨-径流过程模拟中详细描述植被的冠层截留、降水拦截、入渗、蒸散发等生物物理过程,使得模型对水文过程的模拟更符合实际,主要模型有DHSVM模型<sup>[26]</sup>、SHE模型<sup>[27]</sup>、VIC模型<sup>[28]</sup>。但这一类模型仅考虑植被对水文过程的单向影响,不考虑水文过程对植被生理、生化过程及植被动态生长的影响,因此,也就不能描述植被的动态变化(如LAI的季节性增长)对水文过程的影响。DHSVM模型是单向耦合模型的典型代表,该模型是Wigmosta等<sup>[26]</sup>开发的具有物理意义的流域生态水文模型。该模型充分考虑了植被对于蒸散发作用的影响,采用双源模型区分计算植被蒸腾与土壤蒸发,在垂直方向上划分植被林冠层和地面植被层,详细描述冠层内的短波、长波辐射传输,分别计算各层的蒸腾作用。采用Penman-Monteith公式结合冠层导度计算蒸散发,冠层导度采用Jarvis

提出的多环境因子的阶乘公式计算。该模型在空间上为全分布式,通过将流域划分为栅格单元充分体现下垫面的空间异质性,栅格之间通过坡面流和壤中流的逐网格汇流发生进行物质交换。

#### 3.1.2 双向耦合模型

随着生态水文研究的不断深入,学者们逐渐认识到植被的生长发育及其季节性变化会对水文过程的重要影响,流域生态水文双向耦合模型开始出现。双向耦合模型的植被与水文过程的耦合体现在植被为水文模型提供动态变化的叶面积指数、根系深度、枯枝落叶层厚度等,水文模拟为生态过程模拟提供土壤含水量的动态变化等。根据模型中对于植被-水文过程相互作用机制描述的复杂程度,本文将双向耦合模型分为概念性模型、半物理模型、物理模型3大类(表1)。

##### 3.1.2.1 概念性模型

概念性生态水文模型是主要是在水文模型的基础上,耦合了参数模型(或光能利用率模型)或者经验性的作物生长模型建立起来,主要模型有SWAT模型、SWIM模型、EcoHAT模型等。其特点是:①采用简单的、经验性的关系计算植被动态生长,大多通过先计算潜在生长,再引入水分胁迫、养分元素胁迫等来计算实际生产,如光能利用率模型;②对于蒸散发的计算,通过先计算潜在蒸发再折算实际蒸发;③这一类模型对流域空间异质性的表达,大多呈空间半分布式,各个子单元之间相互独立。

这一类模型的缺陷主要在于对植物生长和植被-水文相互作用关系的描述缺乏机理性<sup>[44-45]</sup>,植被与水文过程之间只是松散的耦合关系,限制了模型对环境变化引起的流域生理生态响应的模拟能

表1 双向耦合的流域生态水文模型分类

Tab.1 Classification of the mutually coupled watershed scale eco-hydrological models

类别	特征	光合作用的模拟	蒸腾作用模拟	空间离散化	代表性模型
概念性模型	耦合经验性的植被生长模型与半分布式流域水文模型,对植物生长和植被-水文相互作用关系的描述缺乏机理性	光能利用率模型	潜在蒸发-实际蒸发计算法:先计算潜在蒸发,再根据土壤含水量等修正为实际蒸散发。	大多为半分布式	SWAT <sup>[29-30]</sup> 、SWIM <sup>[31]</sup> 、EcoHAT <sup>[32]</sup>
半物理过程模型	耦合半经验性的光合作用模型与全分布式水文模型,机理性增强,但仍不能刻画水文过程对植被生化过程的影响	半经验性光合作用模型	引入冠层气孔导度的 Penman-Monteith 方程	半分布或全分布式	PnET-II3SL/SWAT <sup>[33]</sup> TOPOG <sup>[34]</sup>
物理过程模型	耦合植被生理生态过程模型与分布式水文模型,将植被的生化过程与水文过程耦合在一起,机理性强。结构复杂,植被参数要求高	Farquhar 生化模型	引入冠层气孔导度的 Penman-Monteith 方程	大多为全分布式	RHESSys <sup>[35-36]</sup> 、Macaque <sup>[37]</sup> 、VIP <sup>[38-39]</sup> 、tRIBS-VEGIE <sup>[40-41]</sup> 、BEPS-TerrainLab <sup>[42-43]</sup>

力。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是概念性生态水文模型的典型代表,该模型由美国农业部开发的农业流域生态水文模型,模型采用简化的作物生长模型 EPIC 模块来计算植被的动态生长,根据光能利用率计算潜在的生物生长量,再根据各种生长胁迫计算实际生长,对作物生长描述缺乏机理性<sup>[46-47]</sup>。模型中对于蒸散发的计算,基于彭曼线性假设,先计算潜在蒸发,再根据潜在蒸发与实际蒸发的线性关系,以及相关植被参数(叶面积指数等)和土壤水分状况计算实际蒸发。在空间尺度上,模型将流域离散为土地利用和土壤类型同质的水文响应单元(HRU),在HRU上独立计算再通过加和获得流域出口的值,HRU在空间上的不明确性以及各HRU之间的相互独立所导致的空间互动的缺乏是该模型存在的一大缺陷<sup>[48]</sup>。

### 3.1.2.2 半物理过程模型

半物理过程模型相对于概念性模型来说,对植被动态生长过程和植被-水文相互作用的描述机理性更强,例如,对于光合作用过程的描述,采用半经验半机理的模型,如碳同化模型;对植被冠层蒸散发过程的模拟,采用Penman-Monteith方法,引入冠层导度直接植被的实际蒸腾量。模型在空间划分上,通常是将流域离散成全分布式的空间单元,详细刻画流域的空间异质性。之所以定义为半物理过程模型,是因为模型对光合作用过程的简化,不能刻画水文过程对植被生化过程的影响。TOPOG模型为这一类型模型的典型代表。该模型是澳大利亚CSIRO研究机构为模拟土地利用变化而建立的流域全分布式生态水文模型。模型根据日光同化速率是最大同化速率与植被生长指数的函数来计算植物生长过程,其中植物生长指数是温度、水等各种胁迫因子的函数,反映各种环境胁迫对植物生长的影响。对于蒸腾作用,TOPOG模型采用Penman-Monteith公式结合冠层气孔导度来计算实际蒸腾量,其中对于冠层气孔导度采用的是Ball和文献Leuning修正的光合-气孔导度耦合模型。Ball-Berry模型是描述气孔导度和光合作用速率之间耦合关系的半理论模型,具有一定的理论基础,在一定程度上耦合了蒸腾-光合作用。模型在空间上根据等高线和分水岭将流域划分为大量的山坡单元,并确定流域的汇水路径。模型汇流采用理查德方程实现逐单元水流演算,计算量非常大,因此只适合于小流域的应用。

### 3.1.2.3 物理过程模型

20世纪90年代以来,植物生理学及生态学研究取得了重大进展,人们逐渐意识到光合作用与蒸腾作用同时受控于气孔行为从而把植被的生化过程与水文过程耦合在一起,考虑植被生理作用生态水文机理过程模型不断出现。早期,Band等在流域分布式水文模型TOPMODEL的基础上耦合森林碳循环模型Forest-BGC,建立了分布式生态水文模型RHESys<sup>[35]</sup>,用以模拟森林流域侧向径流过程对土壤水空间分布的影响以及土壤水的空间分布差异对森林冠层的蒸散发以及光合作用的影响。该模型进一步改进,采用Biome-BGC来模拟多种植被类型的碳循环过程和Century模拟生态系统的氮循环过程<sup>[49-50]</sup>。此后,涌现了许,多物理过程模型,如Macaque<sup>[37]</sup>、VIP<sup>[38-39]</sup>、tRIBS-VEGIE<sup>[40-41]</sup>、BEPS-TerrainLab<sup>[42-43]</sup>等模型。

这一类模型的主要特点是采用植被生理生态机理过程模型来描述植被的光合作用等生理过程,将植被的生化过程与水文过程耦合在一起,一方面能够刻画水文过程尤其是土壤水对于植被生化过程的影响,另一方面能够模拟植被的动态生长如LAI的季节动态变化对于水文过程的影响。模型的缺陷在于计算复杂,涉及植物生理特性参数(如电子传输率、酶活性等)、植被形态参数(如冠层高度)等众多参数,且大部分参数都难以获得<sup>[51-52]</sup>,限制了模型的推广与应用。BEPS-TerrainLab模型是物理过程模型的代表模型之一。该模型是DSHVM模型基础上耦合生物地球化学循环模型BEPs建立的流域生态水文模型,用于加拿大北部森林区碳循环与水循环耦合的基础和应用研究。模型中对于光合作用的模拟采用区分受光叶和隐蔽叶的二叶模型,叶片光合作用基于Farquhar生化模型;植被蒸腾作用的计算,采用引入冠层气孔导度的Penman-Monteith方程,冠层气孔导度采用Jarvis提出的环境因子阶乘公式。模型为全分布式模型,在空间上将流域划分为栅格单元,模型采用逐网格进行汇流演算,栅格之间通过坡面流和壤中流的逐网格汇流发生水文联系,这一算法充分考虑了栅格单元的交互作用,但该汇流方法计算繁琐,在较大的流域应用困难。

## 3.2 流域生态水文模型应用的代表性成果

流域生态水文模型自提出以来,广泛应用于气候变化和人类活动影响下流域生态水文响应研究,

按所模拟的生态系统类型的不同,模型应用代表性成果可以总结为以下两个方面:

### 3.2.1 在湿润森林流域中的应用

湿润区森林流域植被与水的相互作用关系是生态水文学的重要研究内容,利用流域生态水文模型模拟森林管理和气候变化对水循环、碳循环和蒸散发过程的影响等。Band等构建的RHESys在加拿大、美国森林流域气候变化与土地利用变化的生态水文响应过程模拟中得到非常广泛的应用<sup>[53]</sup>。Vertessy等<sup>[54]</sup>基于TOPOG模型模拟澳大利亚热带森林小流域生态水文过程,结果表明模型能较好地模拟植被生长及其对水文过程的影响。Chen等<sup>[42]</sup>利用BEP-TerrainLab模型模拟了加拿大北部森林小流域的蒸散发的季节变化,能够得到合理的流域蒸散发值。这些模型应用成果都显示了流域生态水文模型在湿润森林生态系统中应用的巨大潜力。

### 3.2.2 在干旱半干旱流域中的应用

干旱半干旱区的生态系统非常脆弱,缺水严重制约着植被的生长与生存,植被生态系统对气候变化的响应极其敏感,因此,流域水文模型被广泛应用于干旱半干旱流域中气候变化对蒸散发过程及对农田作物产量的影响及作物耗水的影响等。Rodriguez-Iturbe等<sup>[55-56]</sup>在深入研究水分限制条件下大气-植被-水文独特的相互作用的基础上,构建基于生理生态学基础的生态水文模型,研究了地中海地区稀疏草原气候变化下土壤水的变化及其对植物的生理生态过程响应;Krysanova等<sup>[31]</sup>利用SWIM模型模拟德国的干旱区Elbe流域的生态水文过程;Mo等<sup>[57]</sup>、王永芬等<sup>[58]</sup>构建的VIP模型,能模拟流域不同水平年的(丰水年、平水年、干旱年)的蒸散发及分量的变化,在我国华北平原和黄土高原等地的区域蒸散发和农田产量研究中得到较好的应用。

## 4 存在的关键问题

现有模型在对植被-水文相互作用机制的刻画、流域空间的离散化、模型参数估计、不确定性研究等方面尚存在问题,这些问题也是未来生态水文模型研究的重点,需要开展深入的研究。

### 4.1 植被-水文相互作用机制的描述

对植被-水文的相互作用机制的描述,是生态水文模拟的关键。由于对植被-水文之间交互作用的复杂机理认识尚不完整,在模型中如何合理刻画

生态水文交互作用和动态耦合是生态水文模型构建的难点问题。现有大多数模型所描述的植被与水文过程之间只是松散的耦合关系,并没有充分考虑过程之间的内在联系和动态反馈<sup>[12,42]</sup>。

植被-水文相互作用机制刻画的缺陷充分体现的对植被蒸腾作用的描述。现有的生态水文模型中,对蒸腾作用的计算方法主要有两类:①基于彭曼假设,即实际蒸散发与潜在蒸发成正比,并与植被参数(叶面积指数)和土壤水分状况有关,该方法为经验公式,缺乏生理学基础;②基于Penman-Montieth公式结合冠层阻力直接计算植物实际蒸腾作用。尽管在Penman-Montieth公式采用了具有生物学意义的冠层导度因子,但Penman-Montieth公式本质上为基于能量平衡的物理学公式,把与光合作用紧密耦合的蒸腾作用这一复杂生化过程作为物理过程来处理,存在较大的缺陷<sup>[59]</sup>。

Sivapalan<sup>[59]</sup>认为新一代的生态水文模型,应尽量从生理学的角度出发描述植被与水文的相互作用关系,对植物蒸腾作用的描述,应将其作为生理学过程而非物理学过程来刻画。近年来,一些学者提出了基于生态水文最优性理论来模拟植被-水文相互作用机制,为生态水文的耦合模拟提供了新的思路。Eagleson<sup>[17]</sup>最早将生态最优性理论引入植被与水文相互作用的研究中,提出生态水文的最优化原理(假设)。生态水文最优性假设认为,在自然选择的进化压力驱使下,植被在适应环境的过程中形成最优的水分利用策略等以生产的最大化,植被与水文的相互作用存在最优化机制<sup>[60-61]</sup>。这一理论提出后引起了较大反响,学者们开始探索不同的气候条件和生态系统条件下生态-水文优化机制及水文优化机制的定量化表达。Van der Tol等<sup>[62]</sup>认为植被光合能力是高速率光合作用和低风险水胁迫的权衡结果,以在一个生长季内植被生产最大化为最优性假设,耦合光合作用生化模型Farquhar和土壤-植被-大气连续体水量平衡模型。Schymanski等<sup>[63-65]</sup>以植被“净碳”(NCP)最大为最优性假设,耦合光合作用-蒸腾模型和水量平衡模型,建立冠层尺度的生态水文最优性模型。Caylor等<sup>[66]</sup>在水分受限区,认为最大化水资源利用和最小化水胁迫是植被-水文相互作用的最优化机制。此外,Wang等<sup>[67]</sup>、Pauwels等<sup>[68]</sup>、Lei等<sup>[69]</sup>也开展了相关的研究。

基于植被-水文相互作用的最优化机制来建立生态水文模型,能够从植被-水文相互作用的机制

出发较为合理地刻画植被-水文动态耦合关系。由于植被-土壤-大气之间的复杂作用,不存在统一的生态水文的优化机制,因此,还需要深入开展不同气候条件和不同生态系统类型植被-水文相互作用的最优化机制及其定量化的研究。目前,基于最优化机制建立的生态水文模型仅在点上应用,在流域尺度尚缺乏研究,将其推广应用到流域尺度建立流域尺度的生态水文最优性模型将是未来流域生态水文模型发展的重要趋势。

#### 4.2 流域的空间离散化

流域下垫面的空间离散化或异质性的表达是生态水文模型的核心内容之一<sup>[70-72]</sup>。由于生态过程与水文过程的发生都具有明显的尺度依赖性,特定的过程具有特定的尺度,即特征尺度<sup>[73]</sup>。例如水文过程中,霍顿产流过程是点过程,而蓄满产流的发生则需要一定的空间作用范围。生态过程的发生往往具有一定的空间作用范围,小于这个最小空间作用范围的粒度对刻画生态过程不仅没有意义,而且还可能引入人为误差。生态要素的作用只有在空间范围大于最小作用范围时才能体现,即生态要素的空间作用范围必须大于或等于最小空间作用范围。因此,流域离散化的不合理将导致过程发生的特征尺度与模拟尺度的不匹配,可能引入人为的误差。

现有的生态水文模型对流域的空间离散化,主要有两种:①基于网格划分,大多数基于正方形栅格单元,少数采用等高线和分水岭来划分不规则的山坡单元,如 TOPOG 模型;②基于子流域方法的划分,如 SWAT 模型中,通过划分为土地利用和土壤类型同质的水文响应单元(HRU)来表达空间异质性。这两种方法都存在一定的主观性,如何在流域空间离散化过程中,从流域空间异质性的内在规律出发,充分体现流域过程的特征尺度,将是未来生态水文模型研究的一个非常值得重视的研究问题。

#### 4.3 不确定性问题

生态水文过程包括多种生物物理和生物地球化学过程,具有高度复杂性,对这样的复杂系统进行模拟,往往会出现“失真”现象,导致模型的不确定性<sup>[74]</sup>。不确定性的存在影响了模拟结果可靠程度,从而限制了模型的应用与发展。

针对输入数据、参数、模型结构的不确定性,国内外已经开展大量的研究,其中,普适似然不确定性方法(Generalized Likelihood Uncertainty, GLUE)

方法<sup>[74-75]</sup>和贝叶斯估计<sup>[76-77]</sup>代表了不确定性研究的最新进展。GLUE 方法由 Beven<sup>[74]</sup>提出,该方法认为决定模型最优结果并不是唯一的最优参数组合,而是存在多组功能类似的参数值组合,通过探索模型误差空间,确定敏感性参数,其缺陷在于对模拟结果不加选择、采用主观判断确定可行参数组的阈值、推导得出的后验概率分布过于平坦等,适合于多参数,参数先验知识缺乏的情况。贝叶斯方法将参数的先验分布与似然函数结合获得参数后验分布,对其进行随机抽样得到模拟值的经验分布,根据参数的后验分布及模拟值的经验分布确定参数的不确定性。目前各种不确定性问题的研究方法仍处于探索阶段,有必要深入开展不确定性分析的方法体系研究,以提高模型应用的置信度。

#### 4.4 模型参数估计与数据同化

流域生态水文模拟包括光合作用、呼吸作用等多个过程,每个过程都含有大量参数,在分布式模拟的框架下,如何获取区域异质的模型参数成为生态水文模型区域应用所面临的瓶颈问题。传统的模型参数获取方式主要为站点观测,但观测站点数量有限且分布稀疏,虽然通过插值等空间推测方法可获得参数的空间分布信息,由于植被参数在空间上的变异强烈,参数误差很大。

遥感数据以大面积、快速、动态的优势被广泛应用于模型参数估计中,相对于传统的稀疏离散点获取参数是一种革命性的变革<sup>[78]</sup>。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,如地表反照率、土壤水分、叶面积指数、光合有效辐射、森林郁闭度、冠层结构参数等。但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,数据同化开始活跃于模型参数估算中。

遥感数据同化研究兴起于 20 世纪 90 年代后期,主要采用模型模拟与遥感观测数据相结合的途径来估算地表参数<sup>[79-80]</sup>,其中卡尔曼滤波方法是数据同化中应用最为广泛的方法<sup>[81-82]</sup>。应用数据同化能最大限度地利用不同来源和不同时空分辨率的遥感数据,将是未来流域生态水文模型参数获取的重要手段。

## 5 结语

流域生态水文模拟是定量评估环境变化下流

域生态水文响应的重要手段。目前,国内外对流域生态水文模型已开展了一定深度的研究,并取得了一些阶段性成果。按模型中对植被与水文过程相互作用的描述,将现有模型归为两大类:单向耦合模型和双向耦合模型,其中双向耦合模型可归纳为概念性模型、半物理模型和物理模型。目前,流域生态水文模型在湿润森林流域和干旱半干旱区气候变化的流域生态水文过程响应(如蒸散发过程)及气候变化对作物产量影响研究中得到广泛应用。但现有模型在对植被-水文相互作用机制的刻画、流域空间的离散化、模型参数估计等方面存在一些问题,这些问题也是未来生态水文模型研究的重点。生态水文耦合模型的研究依赖于生态水文学的学科发展和理论研究,生态水文模型的发展要结合生态水文学的最新研究进展,才能够实现模型在理论上的突破。

## 参考文献

- [1] Zalewski M. Ecohydrology: The scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*, 2000, 16(1): 1-8.
- [2] Gurnell A M, Hupp C R, Gregory S V. Preface: Linking hydrology and ecology. *Hydrological Processes*, 2000, 14 (16-17): 2813-2815.
- [3] Bonnell M. Ecohydrology-a completely new idea? *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(6): 809-810.
- [4] Bond B. Hydrology and Ecology Meet? And the Meeting is good. *Hydrological Processes*, 2003, 17(10): 2087-2089.
- [5] 王根绪, 刘桂民, 常娟. 流域尺度生态水文研究评述, *生态学报*, 2005, 25 (4): 892-903.
- [6] Newman B D, Wilcox B P, Archer S R, et al. Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Water Resources Research*, 2006, 42: W06302, doi: 10.1029/2005WR004141.
- [7] 夏军, 左其亭. 国际水文科学研究的新进展. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 256-261.
- [8] ICWE. Development Issues for the 21st Century. The Dublin statement and report of the conference, Dublin, Ireland, 26-31 January 1992. Geneva: World Meteorological Organization.
- [9] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 2000, 36(1): 3-9.
- [10] Arora V. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(2): 1-26.
- [11] 孙晓敏, 袁国富, 朱致林, 等. 生态水文过程观测与模拟的发展与展望. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1293-1300.
- [12] 杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述, *水利学报*, 2010, 41(10): 1142-1149.
- [13] Rodriguez-Iturbe I, D'Odorico P. On the Spatial and temporal links between vegetation, climate, and soil moisture, *Water Resources Research*, 1999, 35(12): 3709-3722.
- [14] Waring R H, Running S W. *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*. 2<sup>nd</sup> Edition. San Diego: Academic Press, 1998.
- [15] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展. *生态学报*, 2003, 23(3): 580-587.
- [16] Chapin S F, Matson P, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer-Verlag Press, 2002.
- [17] Eagleson P S. *Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [18] Harris P P, Huntingford C, Cox P M, et al. Effect of soil moisture on canopy conductance of Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 122(3/4): 215-227.
- [19] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A, Laio F, et al. Plants in water-controlled ecosystems: Active role in hydrologic processes and response to water stress -I. Scope and general outline, *Advances in Water Resources*, 2001, 24(7): 695-705.
- [20] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A. eds. *Ecohydrology of Water Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics*. London: Cambridge University Press, 2005.
- [21] 于贵瑞, 王秋凤, 王绍强, 等. 陆地生态系统水-碳耦合循环与过程管理研究. *地球科学进展*, 2004, 19(51): 831-839.
- [22] 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展, *水科学进展*, 1999, 10(3): 251-259.
- [23] 曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展, *地球科学进展*, 2000, 15(4): 446-451.
- [24] Charney J R. Dynamics of deserts and drought in Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, 101(428): 193-202.

- [25] Soulis E D, Snelgrove K R, Kouwen N, et al. Towards closing the vertical water balance in Canadian atmospheric models: coupling of the land surface scheme class with the distributed hydrological model Watflood. *Atmosphere-Ocean*, 2000, 38(1): 251-269.
- [26] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A Distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 1994, 30(6): 1665-1679.
- [27] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European hydrological system—System Hydrologique Europeen, “SHE”, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1-2): 61-77.
- [28] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [29] Arnold J G, Srinivasan R, Mutiah R S, et al. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [30] Arnold J G, Fohrer N. SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 563-572.
- [31] Krysanova V, Muller-Wohlfeil D, Becker A. Development of the ecohydrological model SWIM for Regional Impact Studies and Vulnerability Assessment. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 763-783.
- [32] 刘昌明, 杨胜天, 温志群, 等. 分布式生态水文模型 EcoHAT 系统开发及应用. *中国科学: E 辑*, 2009, 39(6): 1112-1121.
- [33] Kirby J T, Durrans S R. PnET-II3SL/SWAT: Modeling the combined effects of forests and agriculture on water availability. *Journal of Hydrological Engineering*, 2007, 12(3): 319-326.
- [34] Vertessy R A, Dawes W R, Zhang L, et al. Catchment-scale Hydrologic Modelling to Assess the Water and salt balance behavior of Eucalypt plantations. Technical Memorandum No.96/2, CSIRO Division Water Resources, 1996.
- [35] Band L E, Patterson P, Nemani R, et al. Forest Ecosystem processes at the watershed scale: Incorporating hillslope hydrology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 63(1-2): 93-126.
- [36] Tague C L, Band L E. RHESSys: regional hydro-ecologic simulation system: An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water and nutrient cycling. *Earth Interactions*. 2004, 8(19): 1-42.
- [37] Watson F G R, Vertessy R A, Grayson R B. Large scale modelling of forest hydrological processes and their long-term effect on water yield, *Hydrological Processes*, 1999, 13(5): 689-700.
- [38] Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over Lushi Basin. *Journal of Hydrology*, 2004, 285(1-4): 125-142.
- [39] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 气候变化对无定河流域生态水文过程的影响. *生态学报*, 2007, 27(12): 4999-5007.
- [40] Ivanov V Y, Bras R L, Vivoni E R. Vegetation-hydrology dynamics in complex terrain of semiarid areas: 1. A mechanistic approach to modeling dynamic feedbacks. *Water Resources Research*, 2008, 44, W03430, doi: 10.1029/2006WR005595.
- [41] Ivanov V Y, Bras R L, Vivoni E R. Vegetation-hydrology dynamics in complex terrain of semiarid areas: 2. Energy-water controls of vegetation spatiotemporal dynamics and topographic niches of favorability. *Water Resources Research*, 2008, 44, W03430, doi: 10.1029/2006WR005595.
- [42] Chen J M, Chen X F, Ju W M, et al. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. *Journal of Hydrology*, 2005, 305(1-4): 15-39.
- [43] Govind A, Chen J M, Margolis H, et al. A Spatially Explicit Hydro-ecological modeling framework (BEPS-TerrainLab V2.0): Model description and test in a boreal ecosystem in eastern north America. *Journal of Hydrology*, 2009, 367(3-4): 200-216.
- [44] Kiniry J R, MacDonald J D, Kemanian A R, et al. 2008. Plant growth simulation for landscape-scale hydrological modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, 53(5): 1030-1042.
- [45] 罗毅, 郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 307-312.
- [46] Luo Y, He C, Sophocleous M, et al. Assessment of crop growth and soil water modules in SWAT2000 using extensive field experiment data in an irrigation district of the Yellow River Basin. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(1-2): 139-156.
- [47] 邹定荣. 流域水循环的作物模块耦合与改进及流域环境影响评价. 中国科学院博士后研究报告, 2008.
- [48] Valentina K, Arnold J G. Advances in ecohydrological modelling with SWAT: A review. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, 53(5): 939-947.
- [49] Mackay D S, Band L E. Forest ecosystem processes at the watershed scale: Dynamic coupling of distributed hydrology and canopy growth. *Hydrological Processes*, 1997, 11(9): 1197-1217.
- [50] Band L E, Tague C L, Groffman P, et al. Forest ecosys-

- tem processes at the watershed scale: Hydrological and ecological controls of nitrogen export. *Hydrological Processes*, 2001, 15(10): 2013-2028.
- [51] Schymanski S J. Transpiration as the leak in the carbon factory: A model of self-optimising vegetation [D]. Perth: The University of Western Australia, 2007.
- [52] Van der Tol C, Meesters A, Dolman A J, et al. Optimum vegetation characteristics, assimilation, and transpiration during a dry season: 1. Model description. *Water Resources Research*, 2008, 44(3): W03421. doi:10.1029/2007WR006241.
- [53] Tague C L, McMichael C, Hope A, et al. Application of the RHESSys model to a California semiarid shrub land watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(3): 575-589.
- [54] Vettesy R A, Hatton T J, Benyon R G, et al. Long-term growth and water balance for a mountain ash (*Eucalyptus regnans*) forest catchment subject to clear-felling and regeneration. *Tree Physiology*, 1996, 16(11-12): 221-232.
- [55] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A, eds. *Ecohydrology of water controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics*. London: Cambridge University Press, 2005.
- [56] Rodriguez-Iturbe, I, Porporato A, Laio F, et al. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress -I. Scope and general outline. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(7): 695-705.
- [57] Mo X, Liu S. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109(3): 203-222.
- [58] 王永芬, 莫兴国, 王艳芬, 等. 基于VIP模型对内蒙古草原蒸散季节和年际变化的模拟. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1052-1060.
- [59] Sivapalan M. The Secret to 'Doing Better Hydrological Science': change the question! *Hydrological Processes*, 2009, 23(9): 1391-1396.
- [60] Eagleson P S, 著. 杨大文, 丛振涛, 译. *生态水文学*. 北京: 水利水电出版社, 2008.
- [61] 杨大文, 丛振涛, 雷志栋. *生态水文学: 植被形态与功能的达尔文表达*, 冰川冻土, 2008, 30(5): 903-905.
- [62] Van der Tol C, Dolman A J, Waterloo M J, et al. Meesters optimum vegetation characteristics, assimilation, and transpiration during a dry season: 2. Model evaluation. *Water Resources Research*, 2008, 44(3): W03422, doi: 10.1029/2007WR006243.
- [63] Schymanski S J. Optimality as a concept to understand and model vegetation at different scales. *Geography Compass*, 2008, 2(5): 1580-1598.
- [64] Schymanski S J, Sivapalan M, Roderick M L, et al. An optimality-based model of the coupled soil moisture and root dynamics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12(3): 913-932.
- [65] Schymanski S J, Sivapalan M, Roderick M L, et al. An optimality-based model of the dynamic feedbacks between natural vegetation and the water balance. *Water Resources Research*, 2009, doi: 10.1029/2008WR006841.
- [66] Caylor K K, Scanlon T M, Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrological optimization of pattern and processes in water-limited ecosystems: A trade-off-based hypothesis. *Water Resources Research*, 2009, 45, W08407, doi:10.1029/2008WR007230.
- [67] Wang J, Bras R L, Lerdau M, et al. A maximum hypothesis of transpiration. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112. doi: 10.1029/2006JG000255.
- [68] Pauwels V R N, Verhoest N E C, De Lannoy G J M, et al. Optimization of a coupled hydrology-crop growth model through the assimilation of observed soil moisture and leaf area index values using an ensemble Kalman filter. *Water Resources Research*, 2007, 43, doi: 10.1029/2006WR004942.
- [69] Lei H, Yang D, Schymanski S J, et al. Modeling the Crop Transpiration using an optimality-based approach. *Science in China: Series E*, 2009, 51(S2): 60-75.
- [70] Band L E, Moore I D. Scale: Landscape attributes and geographical information systems. *Hydrological Process*, 1995, 9(3-4): 401-422.
- [71] Band, L E, Tague C L, et al. Modeling watersheds as spatial object hierarchies: structure and dynamics. *Transactions in GIS*, 2000, 4(3): 181-196.
- [72] Chen X F, Chen J M, An S Q, et al. Effects of topography on simulated net primary productivity at landscape scale. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 585-596.
- [73] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes*, 1995, 9 (3-4): 251-290.
- [74] Beven K J, Binley A M. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 1992, 6(3): 279-298.
- [75] Beven K J. *Rainfall-runoff Modelling: The Primer*. Chichester: Wiley, 2001.
- [76] 梁忠民, 戴荣, 李彬权. 基于贝叶斯理论的水文不确定性分析研究进展. *水科学进展*, 2010, 21(2): 274-281.
- [77] Duan Q, Ajamin K, Gao X, et al. Multi-mode ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(5): 1371-1386.
- [78] 赵英时. *遥感应用分析原理与方法*. 北京: 科学出版社, 2003.

- [79] Pauwels V R N, Verhoest N E C, De Lannoy, et al. Optimization of a coupled hydrology-crop growth model through the assimilation of observed soil moisture and leaf area index values using an ensemble Kalman filter. *Water Resources. Research*, 2007, 43, W04421, doi: 10.1029/2006.WR004942.
- [80] Pellenq J, Boulet G. A methodology to test the pertinence of remote-sensing data assimilation into vegetation models for water and energy exchange at the land surface. *Agronomie*, 2004, 24(4): 197-204.
- [81] Pastres R, Ciavatta S, Solidoro C. The extended Kalman filter (EKF) as a tool for the assimilation of high frequency water quality data. *Ecological Modeling*, 2003, 170 (2-3): 227-235.
- [82] Mo X, Chen J M, Ju W, et al. Optimization of ecosystem model parameters through assimilating eddy covariance flux data with an ensemble Kalman filter. *Ecological Modelling*, 2008, 217(1-2): 157-173.

## Review of Eco-hydrological Models of Watershed Scale

CHEN Lajiao<sup>1,2</sup>, ZHU Axing<sup>1,3</sup>, QIN Chengzhi<sup>1</sup>, LI Runkui<sup>1,2</sup>, LIU Jing<sup>3</sup>, LIU Junzhi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA)

**Abstract:** Eco-hydrological model of watershed scale is an essential tool to assess the impact of environmental change on watershed hydrological and ecological processes. This has made eco-hydrological model a hot research focus, and significant advances have been achieved during recent years. This paper provides a perspective on the current state of the research on eco-hydrological modeling. Firstly we elaborate the characteristics of the interaction between vegetation and hydrological processes and the requirements for watershed eco-hydrological modeling. Then the existing models are classified according to the detail levels of their description of the eco-hydrological interaction. Different types of eco-hydrological models and their respective advantage and disadvantage are summarized. Finally, the key problems and research issues (i.e., eco-hydrological interaction, parameters estimation and the problem of uncertainty) for eco-hydrological modeling are addressed.

**Key words:** eco-hydrological model; vegetation; hydrological processes; ecohydrological interaction; global change

本文引用格式:

陈腊娇, 朱阿兴, 秦承志, 等. 流域生态水文模型研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(5): 535-544.