



张新生,卢杰.森林水文模型的研究进展[J].黑龙江农业科学,2021(8):129-136.

森林水文模型的研究进展

张新生,卢杰

(西藏农牧学院 高原生态研究所/西藏高原森林生态教育部重点实验室/西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站,西藏 林芝 860000)

摘要:森林水文模型是围绕森林水文学研究内容构建的,其模型模拟的是森林水文过程中所需要的数据,既可以对未来森林水文情况进行预测,也可以对历史残缺水文资料进行补充。为促进森林资源与水资源的保护与发展,本文主要以3种方法对模型的类型进行划分,围绕森林水文学研究的5个内容(林冠截留、流域径流量、林地土壤水分运动、林地蒸散发、水质)构建模型,并进一步探讨森林水文模型在未来研究中的发展前景。目前,森林水文模型主要存在两个问题:一是模型检验方面缺乏精确性;二是历史水文气象资料缺乏。对此,有必要加大对森林水文模型的研究力度,确定模型分类方法,提高模型精确性,解决历史水文气象资料缺少问题,进一步促进森林水文学的发展。

关键词:森林水文;水文模型;分类方法

20世纪80年代美国学者 Kittredge 提出森林对水有重要的作用,水也是森林不可缺少的生态因子,应该把森林与水结合,单独成为一门学科即森林水文学^[1]。森林水文学涉及生态学和水文学,其研究重点主要包括两方面:宏观上森林整体与水文特征的相互作用;微观上主要研究森林中的水文特征以及水文机制,从而探究森林水文运动规律^[2]。从宏观与微观上对森林水文进行研究,就需要建立数学模型,模拟森林水文现象,分析森林水文效应。因此,学者们开始通过森林水文模型研究森林水文的规律及机制。

森林水文模型作为森林水文研究的重要工具,将被更多的森林水文学者接受和使用,并且随着对森林水文模型研究的深入以及学者们的创新,适合中国水文流域的森林水文模型不断出现。本文从森林水文模型的研究历程出发,根据分类方法把森林水文模型划分为6种类型,并围绕林冠截留、流域径流量、林地土壤水分运动、林地蒸散发、水质5个研究内容构建模型,阐述了森林水文模型的作用,旨在为今后森林水文学的研究提供理论参考。

1 研究历程

1.1 研究早期

森林水文模型主要依靠电子计算机进行模拟,因此计算机技术制约其发展。研究早期,在国内计算机技术落后、计算手段简单且计算速度慢,水文模型的发展受到极大限制,只能根据检测的数据进行简单的模拟与统计。陈祖明等^[3-5]为了研究森林水文效应,分别应用 FCHM 结构的融雪模型和枝叶截蓄的蒸散发模型,在不同森林流域内通过模型模拟参数;黄平等^[6]建立森林坡地的二维分布型水文模型,对森林坡地的径流和下渗过程进行了简单的数据分析;于澎涛等^[7]根据森林水文学的相关理论,建立官司河分布式森林水文模型,模拟四川绵阳官司河流域的森林水文过程。

国外较早开始对森林水文模型研究是 McCarthy 等^[8]以火炬松人工林为研究对象,建立流域水文模型,描述森林流域的降雨截留、地下排水和蒸散发量以及森林系统的水文情况;Koivusalo 等^[9]应用水文模型识别以及解释两个流域水文行为观测的差异;Wegehenkel 等^[10]利用位于德国东北部冰碛地貌的中尺度流域的空间数据集,对半分布式水文概念集水区模型进行模拟,将实测日实际蒸散率、土壤含水量和排放率与相应模拟模型输出后进行比较,估算模型的模拟质量。

1.2 研究中期

随着计算机技术的进步以及计算机的普及,各种森林水文模型纷纷建立,尤其是概念型森林

收稿日期:2021-04-06

基金项目:科技部国家野外科学观测站(生态系统)运行补助项目(2015-2020);西藏高原森林生态教育部重点实验室研究生创新计划项目(XZA-JYBSYS-2021-Y13)。

第一作者:张新生(1998-),男,在读硕士,从事森林生态研究。E-mail:739584818@qq.com。

通信作者:卢杰(1973-),男,博士,教授,从事高海拔森林植物、森林水文等研究与教学工作。E-mail:tibetlj@163.com。

水文模型得到进一步发展。陈军锋等^[11]在研究长江上游流域时,使用 CHARM(Climat and Human Activities-Sensitive Run off Model)模型与 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型进行森林水文过程分析;刘建梅等^[12]构建并验证岷江上游高山峡谷森林流域分布式森林水文模型;陈建等^[13]使用 SWAT 森林水文模型对贡嘎山海螺沟的 4 种不同植被流域进行参数灵敏度分析。

由于森林水文学得到越来越多学者的关注,森林水文模型也得到进一步的研究。Winai 等^[14]利用 SWAT 水文模型,根据数字高程模型(DEM)提供的地表地形,对泰国南河上游复杂动态问题进行研究;Bie 等^[15]在德国那河流域将 WaSiM-ETH 模型模拟的日蒸散发与遥感图像反演的日蒸散发进行比较,然后对分布式森林水文模型的地表阻力进行校正;Semenova 等^[16]为研究俄罗斯受害高原山地盆地森林火灾后短期水文响应变化,采用水文模型 Hydrograph 模拟稳态火灾前和非稳态火灾后两种情况下的径流形成过程;Su 等^[17]为保护新加坡仅存的一片原始淡水沼泽森林,建立了一个综合森林水文模型对水文变化进行数值模拟,以评估未来气候变化的影响,并促进未来的森林水文管理。

1.3 研究现状

随着高新技术产业的发展,微型计算机得到快速普及,并且性能也越来越强,可以进行更加复杂的计算,国内的森林水文学者能够设计出更加复杂和接近实地检测物理数据的森林水文模型结

构。丁勇等^[18]将 Penman-Monteith (P-M)模型耦合到新安江模型当中,对流域蒸散发进行了有效估算;崔东文等^[19]利用随机漂移粒子群(RDP-SO)的算法构建 RDPSO-RF 森林水文模型,并且通过对云南某水文站的检测数据进行检验,发现其模型预测精度较高,泛化能力较强;林峰等^[20]运用 SWAT 森林水文模型揭示不同时间尺度上,森林分布水源涵养量在不连续流域的差异。

在国外,近 3 年学者们加深了对森林水文学的研究,也扩展了森林水文模型的研究范围。Sun 等^[21]为了明确地模拟林冠间隙中森林-雪的相互作用,对广泛使用的分布式水文模型一分布式水文土壤植被模型进行了重大改进,该模型明确评估了林冠间隙对流域尺度的季节性河流流量的影响;Cecilio 等^[22]利用 SWAT 森林水文模型对巴西大西洋雨林流域的河流流量进行建模,模拟森林覆盖增加和减少下的土地利用变化情况;Zema 等^[23]为解决地中海森林生态系统中火灾消极水文效应预测的问题,对 MMF(Morgan-Morgan-Finney)模型进行改进,并且改进后 MMF 模型成功预测了地中海森林季节性地表径流和土壤流失,使得未燃烧的地区和受野火影响的地区得到了保护。

2 森林水文模型的分类及建立

2.1 模型的分类

由表 1 可知,对森林水文模型进行分类的方法主要有 3 种:模拟空间和时间尺度、模拟手段以及模拟参数。

表 1 森林水文模型分类及其具体应用模型

分类方法	分类	具体应用模型
模拟空间、时间尺度	集总式模型	SVAT、HYDROM、SWIM、SHE、新安江模型、SCS、SPAC、系统动力学模型、HYDRROM、EPIC、SWAP、LPJ、DEMNAT-TOPMODEL、TOPOG、SWAT、IHDM、SWIM、PRMS、TANK、ANSWERS、HSPF、DHSVM
	分布式与年、月、日或更短时段模型	
模拟手段	机理模型	Penman-Monteith、Horton、系统响应模型、透水系系数模型、Pattern、MARIOLA、FOREST-BGC、ICHORS、HYVEG、ITORS、TOPOG-Dynamic、ECOH、Rutter、Gash、Dalton、DCA、回归模型、Philip、NTE、MOVE
	经验模型	
模拟参数	确定性水文模型	Darly-Richards、Boussinesque、Hagan Poiseuille、Laplace、Manning、Monte Carlo、马尔可夫模型
	随机、非确定性水文模型	

2.1.1 模拟空间及时间尺度分类 从模拟空间尺度上对森林水文模型进行划分主要有两种类型即集总式与分布式。集总式水文模型是指从整体上对森林水文过程进行分析,把整个流域当作一

个单元,不考虑时空异质性的森林水文模型。其代表性模型研究有许波刘等^[24]为解决喀斯特流域缺乏水文资料的现状,以三水源新安江模型为基础,建立了集总式的喀斯特水文模型;Darband-

sari 等^[25]在加拿大安大略湖北部的大东河和黑河流域对 7 个集总式概念水文模型进行了彻底的比较,以确定重现水文图不同组成部分(包括数据不足的流域的低流量和高流量)的最佳性能模型。集总式水文模型的特点有两个方面:一是模型假定流域空间性质均一,不考虑森林水文过程的下垫面条件以及气候条件的时空差异;二是模型所需要的参数较少,在进行模型模拟时需要进行参数校正。分布式水文模型是近年来学者们研究森林水文使用最多的模型。它是通过对水文过程的物理描述,并考虑森林水文环境要素的时空异质性,模拟及预测土地和森林变动对未来森林水文过程有何变化的一种森林水文模型。其代表性模型研究有何小刚等^[26]基于分布式水文模型和气象相关分析,对汉江丹江口水库的月入库径流进行预测;Ho 等^[27]采用分布式水文模型 TOPMODEL 对森林小流域的风暴水文过程进行模拟,并采用蒙特卡罗方法对 TOPMODEL 的参数进行了标定。分布式水文模型的特点:考虑森林水文流域内的空间异质性,并将森林水文过程进行网格化处理;可以解决其他模型无法将某种植被状况进行预测的缺陷,有效评价和预测森林水文活动。

从模拟时间尺度上对森林水文模型进行划分主要有 3 种森林水文模型。以日或更短时间进行森林水文过程模拟的代表性研究有石静涛等^[28]在安康水电站以广义线性模型降尺度方法和分布式水文模型(VIC)模拟水库的日径流过程;王斌等^[29]为解决我国在高寒区缺乏水文数据以及时空分辨率不高的问题,建立栅格分布式水文模型模拟我国高寒区的日流量。其特点是需要输入日或更短时段的气象数据,主要用于模拟森林水文过程中的洪峰和日流量。以月为时间段进行森林水文过程模拟的代表性研究有王栋等^[30]运用 CEEMD-BP 模型模拟并预测青海湟水河流域的月径流;王亮等^[31]在滦河流域的 3 个雨量站使用月尺度的协同克立格模型对缺测月降水量数据进行插补延长。其特点是用于某个区域或者全球的水量平衡计算。以年为单位进行森林水文过程模拟的代表性研究有郝莹等^[32]在全球 1.5 和 2.0 °C 升温下通过 SWAT 水文模型模拟潮白河流域年径流量、年平均降水量的变化情况;Tian 等^[33]以鄱阳湖流域为研究对象,采用 Nash-Sut-

cliffe 效率目标函数校准的两个水文模型系统研究了干旱年降水-径流的关系。年森林水文过程模拟的特点是在某个区域或全球进行长时间的水资源计算。

2.1.2 模拟手段分类 从模拟手段上对森林水文模型进行划分主要有两类:机理模型与经验模型。机理森林水文模型是指基于自然规律以及森林水文过程的理论模型,主要用于测定生态水文的平衡要素,模拟及预测森林与水文的耦合过程,分析植被的森林水文效应。机理水文模型主要有透水系数模型、分布式水文模型、ECOH、Horton、Penman-Monteith 等。其模型代表性研究有刘春雨等^[34]在小兴安岭的典型集水区构建分布式水文模型(NEHM)模拟汤旺河流域的日径流过程;曲迪等^[35]改进的 DHSVM 水文模型以及 Penman-Monteith 水文模型模拟塔河森林生态系统的蒸散发,并估算塔河在 2007 年的逐日蒸散发。其模型的特点是模型构建复杂且有物理意义,揭示大气-土壤-水文三要素之间的因果关系。

经验模型是指基于历史资料对森林水文过程模拟,同时可以对植物水环境进行排序以及预测森林对水文的影响的一种森林水文模型。其代表性研究有朱丽等^[36]使用华北土石山区流域内 1990、1995、2000 和 2005 年 4 年的遥感数据,利用分布式水文模型模拟单一森林类型下的森林水文过程;丁程锋等^[37]为定量分析天山中部河流域森林水文过程,使用乌鲁木齐河流域在 1980—2013 年的水文气象资料,采用 SWAT 模型模拟不同丰枯年份流域内云杉林变化对森林水文过程的影响。其模型特点是模型构建简单,并且模型构建需要的流域参数少,对森林水文过程预测的结果较好,但是在变化条件下此模型不能反映实时的水文规律。

2.1.3 模拟参数分类 以模拟参数作为分类方法,森林水文模型主要划分为两类:确定性水文模型以及随机、非确定性水文模型。确定性水文模型是指森林水文现象进行某种确定性概化模拟的森林水文数学模型,主要用于预测土壤溶质迁移过程以及模拟植被对河川径流的影响。确定性水文模型在森林水文过程的研究中起着重要作用,其代表性研究有 Hagemann 等^[38]在欧盟水与全球变化综合项目(WATCH)中,使用最先进的一套水文模型,对 MPI-OM、CNRM-CM3 以及 LM-

DZ-4 的 3 个耦合模型的每日时间序列偏差进行修正;王佳佳等^[39]在三峡水库的巴东新城区使用准动态湿度指数建立的水文-力学耦合模型预测滑坡灾害危险性。其模型特点是模型的输入与输出结果确定;模型模拟森林水文过程可以基于物理过程,也可以基于历史资料。

随机、非确定性水文模型主要有两种:Monte Carlo、马尔可夫模型。它是对森林水文过程的随机性模拟,其参数与要素模拟也是不确定的。随机、非确定性水文模型的代表性研究有李月玉等^[40]利用基于多组群教学优化的随机森林预测方法,模拟云南省盘龙河龙潭站 1952—2005 年的水文数据,验证 MGTLO-RF 预测模型的准确度;柴颖^[41]采用随机森林回归分析的方法,通过构建随机径流预报模型,对西峡水文站 1970—2010 年的森林水文过程进行模拟。其模型特点是在进行模型输入、输出结果时具有随机性,并且有概率论分布的可能。

2.2 模型的建立

森林水文学的研究内容包括林冠截留、流域径流量、林地土壤水分运动、林地蒸散发、水质等,而森林水文模型就是对森林水文过程的模拟,所以模型的建立主要围绕森林水文学的研究内容。

2.2.1 林冠截留模型

林冠截留是指在降雨过程中雨水被森林林冠截留,截留量主要由林分郁闭度以及林冠干燥度决定。由于不同的森林植被类型有着不同的截留能力,所以建立森林水文模型时也会有所不同。

林冠截留模型主要有 3 种:经验、半经验模型、概念模型以及理论模型。经验、半经验模型是只考虑降雨量,不考虑生物与气候因素建立的线性或非线性模型。其代表性研究有刘丽娟等^[42]在建立岷江杂古脑流域森林水文模型时,将林冠截留的数据全部作为蒸发数据,不参与林内水循环,构建森林水文模型的子模型即林冠截留模型。概念模型考虑叶面积大小、当地的气候条件、海拔、地形以及降雨历时等众多因素。概念模型容易理解,但是不能反映森林水文的动态过程,如田富强等^[43]根据场次降雨建立概念指数模型,对森林水文模型中的植被林冠截留数据进行误差分析。理论模型是根据林冠截留的降雨规律和光传播理论模型建立起来的,其模型解决了经验模型与概念模型的弊端,较详细地模拟了森林水文的

动态过程。代表性研究有郑绍伟等^[44]在长江上游的两个流域内利用 FCHM 森林水文模型模拟森林覆盖率增加后的森林水文过程,模拟结果得出植被林冠截留在降水量一样的情况下,林冠截留量随着蒸散发能力的强弱发生变化。

2.2.2 流域径流量模型

对流域径流量进行研究的方法主要有 3 种:径流小区法、集水区以及天然坡面径流场。因此,森林水文模型建立和模拟的空间尺度也分为 3 种。森林水文模型以径流小区为尺度的代表性研究有周方录等^[45]利用 GIS-Arc Map 构建小尺度分布式降雨-径流数值模型,模拟六道沟流域与 Bukuro 流域的径流情况;温熙胜等^[46]以三峡库区内的缙云山为研究区,以坡耕地为对照建立 5 种森林植被结构的径流小区。以集水区为尺度的森林水文模型研究有 Natara-jan 等^[47]以 Koraiyar River 流域为研究区,使用水文模拟系统来模拟未测量集水区的降雨-径流过程;Hughes 等^[48]提出了一个基于物理的空间分布式水文模型 SHETRAN-Reservoir,并在英国湖区国家公园的集水区使用该模型模拟水文响应过程。以天然坡面径流场为空间尺度进行森林水文模型研究有杨振华等^[49]以西南喀斯特地区坡面为研究对象,建立坡地产流模型模拟坡地产流过程;包红军等^[50]以 Holtan 产流为基础建立 Grid-Holtan 森林水文模型,模拟沁河孔家坡流域的坡面与河道汇流情况。

2.2.3 林地土壤水分运动模型

林地土壤水分运动是指流域内水分在土壤中的传输和运移。其中土壤持水能力与下渗能力是林地土壤水分运动的关键,其能力受土壤的物理性质、土壤含水量以及降雨强度大小影响。在森林水文过程中,林地土壤水分运动占据着重要地位,其代表性研究有李超群等^[51]基于 Horton 下渗曲线对 TOPMODEL 半分布式水文模型进行改进,并采用 4 个流域的水文资料检验模型的精准度;王国庆等^[52]根据土壤、植被在流域内的分布资料,在确定土壤以及植被参数后,应用 VIC (Variable Infiltration Capacity) 模型模拟黄河流域的径流量。

2.2.4 林地蒸散发模型

林地蒸散发是指森林内土壤和植被表面的水分蒸散以及植被的蒸腾作用。由蒸散与蒸腾数据计算林地蒸散发速率,其速率大小由下垫面和气象条件决定。林地蒸散发作为森林水文过程中水分循环的重要一环,其代

表性研究有邓慧平^[53]为了解气温条件对西南林区森林水文效应的影响,以梭磨河流域为研究区,使用 SSiB4/TRIFFID 与 TOPMODEL 的耦合模型 SSiB4T/TRIFFID 模拟气温变化在梭磨河流域的总径流与总蒸散发;尹剑等^[54]基于数据同化系统对森林水文模型模拟的蒸散发数据的矫正作用,通过对水文模型以及遥感技术的研究,建立了确定性集合卡尔曼滤波同化系统,使蒸散发精度更加准确。

2.2.5 监测水质模型 20 世纪 50 年代初,我国开始关注森林水文水质问题,但是对水质研究不深。随着环境的恶化,学者们开始重视水质问题,并对森林水文过程中水质情况进行研究。20 世纪 50 至 80 年代以来,森林水文工作者建立了众多森林生态研究站监测森林水质情况。使用森林水文模型对森林水质进行模拟的代表性研究有王佳等^[55]为解决水质监测频率低、难度大、因素复杂以及信息获取困难等问题,以都匀市剑江河流域为研究区,使用分布式水文模型模拟水质监测数据;韩莉等^[56]介绍了基于 BASINS 半分布式水文模型构建的 HSPF 模型,对模型模拟的水文水质、泥沙侵蚀以及污染物迁移进行了详细的描述。

3 森林水文模型的作用

森林水文模型是一种借助现代技术的新型水文研究方法,比传统水文观测方法更具有便利性,其作用主要有 4 个方面。

3.1 综合分析和尺度转换

森林水文模型是运用众多数学公式形成的数学模型,在这个数学模型中可以模拟多个水文数据,其模型检验使用任何一个实地观测的水文数据即可。在森林水文过程中,只有把过程中的所有要素看成一个整体,综合分析各个变量,才能确定某一变量在整个森林水文过程中的作用。但是在具体的森林水文过程研究中,很少有森林水文检测站能够对所有水文数据进行观测。因此,借助森林水文模型对观测数据进行补充,从而获得各种水文数据,达到野外水文观测的目的。

在尺度转换方面,森林水文模型发挥着重要作用。当前的森林水文观测多以山坡和小流域地区为主,缺少对大流域地区的观测。对于森林水文过程的研究,不能仅仅局限于小尺度的研究,要从大尺度方向进行探索,因此,森林水文模型的作用得到显现。大尺度的研究多需要在模型中输入

GIS 数据进行分析,例如 Niyazi 等^[57]利用地理信息系统(GIS)、流域建模系统(WMS)以及水文建模系统(HEC HMS)分析吉赞盆地不同降水重现期的径流和库容;Thakur 等^[58]综合利用遥感、GIS 和水文模型对喀拉拉邦 12 个主要河流子流域进行水文模拟,研究 2018 年喀拉拉邦洪水爆发情况。

3.2 验证科学假设及深化水文机制

森林水文模型具有物理意义,在模型模拟过程中可以揭示森林水文过程中的因果关系,验证学者提出的科学假设。如 Ombadi 等^[59]通过描述 4 种因果方法(格兰杰因果、转移熵、基于图的算法和收敛交叉映射),使用水文模型生成的数据,评估它们在检索因果信息时的表现,利用因果分析检验灌丛地区夏季和冬季蒸散的因果驱动因素并提出相关假设;Fidal 等^[60]基于二项分布的假设检验,对泰晤士河流域 27 个城市集水区两种降雨-径流模型性能进行比较。因此可以得知,具有物理意义的森林水文模型可以验证各种科学假设,促进学者对流域水文机理的了解,深化水文机制的研究。

3.3 在干扰条件下预测水文响应

森林水文模型其中一个作用是预测受未来人为影响或自然条件干扰的森林水文事件。人为影响主要包括人工造林、水土保持措施、退耕还林等,其代表性研究有 Gai 等^[61]利用一种基于物理的降雨-径流模型评估人类干预对中国渭河流域洪水和低流量的影响;Zhang 等^[62]基于 Web 的开源框架,通过 SWAT 模型的在线模拟和可视化来研究气候变化和人类活动的水文影响。自然条件干扰的因素包括生物因素(病虫害、植被演替等,人为原因除外)和非生物因素(气候变化、火灾等)。对自然因素干扰的森林水文过程进行模型模拟,需要长期的观测数据,例如白琪阶等^[63]基于 SWAT 森林水文模型对漳卫南运河流域 1976—1995 年的日径流量数据进行模拟,分析自然因素对森林水文过程的影响;Wang 等^[64]通过建立一种新水文模型模拟高、中、低、未烧伤 4 种程度下植被截留情况和 SWR 效应。

3.4 提高森林水文工作者的专业素养

森林水文模型模拟的整个森林水文过程是复杂的。准确描述水文过程中各因素对水分循环的影响,需要森林水文工作者了解水分在森林生态

系统各个成分中发挥的主要作用,并根据现有相关森林水文文献,通过众多数学方程表达出水文变量与影响元素之间的关系。同时,森林水文过程检测的数据众多,资料输入将占用大量时间,这就迫使森林水文工作者必须熟悉所用模型输入数据,并且模型模拟的过程将使学者更加深入地了解森林水文过程的物理意义。

4 存在的问题

随着学者们对森林水文的重视以及森林水文学与其他学科的相互渗透,导致森林水文学所涉及的领域越来越广,一些与森林水文相关的新兴学科正在产生,构建的森林水文模型也越来越多。并且在全球变化的大背景下,森林水文工作者研究森林水文模型的建立涉及到 GIS、TOPMOD-EI 以及数据管理等技术,这进一步的促进了森林水文学的发展。虽然利用各种先进技术建立的现代森林水文模型已经取得了一定的成就,但是在某些领域缺乏对森林水文模型解释的普遍性规律和统一性理论,这就导致学者们对问题存在争议和分歧。

对于森林水文模型的使用必须注意两个问题。一是森林水文模型在得到充分的检验后才能用于具体数据模拟以及预测未来森林水文过程。地形及土地利用情况复杂、水土流失问题严重、人为活动等对森林水文过程的干扰性很大。因此,要选择适合本地区的模型,其精度与可靠性才高,才能反映真实的森林水文过程。二是构建新的森林水文模型或检验已有的模型需要以现有观测资料为数据基础。与美、日、英等发达国家相比,中国森林水文观测站点较少,设备不全,缺乏相应人才,导致历史水文资料奇缺。仅有的水文数据资料也没有公开为研究人员所用,这都阻碍了森林水文模型开发研究。

5 展望

森林作为陆地上最大的生态系统,不仅生物多样性丰富,而且具有水源涵养、水土保持及净化水质的作用;水分是森林生态系统中重要的生态因子,限制森林的生长发育状况;因此,森林与水两者相辅相成,缺一不可。受气候和地形的影响以及人为因素,中国森林生态系统种类复杂,模型构建需要大量的研究资料。因此,为避免盲目使用模型森林水文来预测未来森林水文过程,共享

历史水文气象资料将有利于推动中国森林水文模型的开发研究。同时,未来森林水文模型的研究应该与更多学科相结合,加强对森林水文过程与水文尺度、水文机理、气候变化等方面的模型构建,提出森林水文模型构建的普遍性规律和统一性理论,保证模型模拟数据的精确度,促进森林水文学的发展。

参考文献:

- [1] 刘珉,吴志祥.森林生态系统水循环研究概述[J].热带农业工程,2012,36(1):13-20.
- [2] 张卓文,廖纯燕,邓先珍,等.森林水文学研究现状及发展趋势[J].湖北林业科技,2004(3):34-37.
- [3] 陈祖铭,任守贤.FCHM 结构与融雪模型——森林流域水文模型研究之一[J].四川水力发电,1994(1):11-15,96.
- [4] 陈祖铭,任守贤.枝叶截蓄与蒸散发模型及界面水分效应——森林流域水文模型研究之二[J].四川水力发电,1994(2):21-27.
- [5] 陈祖铭,任守贤.模型参数确定与计算实例——森林流域水文模型研究之三[J].四川水力发电,1994(3):56-62.
- [6] 黄平,赵吉国.森林坡地二维分布型水文数学模型的研究[J].水文,2000(4):1-4.
- [7] 于澎涛,徐德应,王彦辉.应用官司河分布式水文模型模拟流域降雨—径流过程[J].林业科学,2003(1):1-9.
- [8] MCCARTHY E J, FLEWELLING J W, SKAGGS R W. Hydrologic model for drained forest watershed[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1992, 118(2): 242-255.
- [9] KOIVUSALO H, KOKKONEN T, LAUREN A, et al. Parameterisation and application of a hillslope hydrological model to assess impacts of a forest clear-cutting on runoff generation[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(9):1324-1339.
- [10] WEGEHENKEL M, JOCHHEIM H, KERSEBAUM K C. The application of simple methods using remote sensing data for the regional validation of a semidistributed hydrological catchment model[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2005, 30(8/10):575-587.
- [11] 陈军锋,李秀彬,张明.模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响[J].中国科学:地球科学,2004,34(7):668-674.
- [12] 刘建梅,裴铁璠,王安志,等.高山峡谷地区森林流域分布式降雨-径流模型的构建与验证[J].应用生态学报,2005,16(9):1638-1644.
- [13] 陈建,梁川,陈梁.SWAT 模型的参数灵敏度分析——以贡嘎山海螺沟不同植被类型流域为例[J].南水北调与水利科技,2011,9(2):41-45.
- [14] WINAI W, KOBKIAT P, CHINNAPAT S, et al. The effect of reforestation on stream flow in Upper Nan river basin using soil and water assessment tool (SWAT) model [J]. International Soil and Water Conservation Research,

- 2013,1(2):53-63.
- [15] BIE W W, CASPER M C, VOHLAND R, et al. Surface resistance calibration for a hydrological model using evapotranspiration retrieved from remote sensing data in Nahe catchment forest area[J]. IAHS-AISH P, 2015, 2015, 368: 81-86.
- [16] SEMENOVA O M, LEBEDEVA L S, NESTEROVA N V, et al. Evaluation of short-term changes of hydrological response in mountainous basins of the Vitim Plateau (Russia) after forest fires based on data analysis and hydrological modelling[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 371: 157-162.
- [17] SU Y J, GUO Q H, FRY D L, et al. A vegetation mapping strategy for conifer forests by combining airborne lidar data and aerial imagery [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2016, 42(1): 1002-1009.
- [18] 丁勇, 周艳春. 基于遥感植被信息的新安江模型及其应用[J]. 东北水利水电, 2015, 33(9): 50-52, 72.
- [19] 崔东文, 郭荣. 基于随机漂移粒子群优化的随机森林预测模型及水文应用实例[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(2): 6-10.
- [20] 林峰, 陈兴伟, 姚文艺, 等. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析[J]. 地理学报, 2020(5): 1065-1078.
- [21] SUN N, Wigmosta M, ZHOU T, et al. Evaluating the functionality and streamflow impacts of explicitly modeling forest-snow interactions and canopy gaps in a distributed hydrologic model[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(13): 2128-2140.
- [22] CECÍLIO R A, PIMENTEL S M, ZANETTI S S. Modeling the influence of forest cover on streamflows by different approaches[J]. Catena, 2019, 178(6): 49-58.
- [23] ZEMA D A, NUNES J P, LUCAS-BORJA M E. Improvement of seasonal runoff and soil loss predictions by the MMF (Morgan-Morgan-Finney) model after wildfire and soil treatment in Mediterranean forest ecosystems[J]. Catena, 2020, 188(104415): 1-13.
- [24] 许波刘, 董增川, 洪炯. 集总式喀斯特水文模型构建及其应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 37-42, 58.
- [25] DARBANDSARI P, COULIBALY P. Inter-comparison of lumped hydrological models in data-scarce watersheds using different precipitation forcing data sets: Case study of Northern Ontario, Canada[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, 31(100730): 2-22.
- [26] 何小刚, 赵铜铁钢, 杨大文. 分布式水文模型与气象遥相关分析相结合的丹江口水库月入库径流预测[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 4-9.
- [27] HO L S, MYEONG W B, JUN I S. Estimation of storm hydrographs in a small forest watershed using a distributed hydrological model[J]. Korean Journal of Ecology and Environment, 2008, 41(1): 43-53.
- [28] 石静涛, 金文婷, 朱悦璐. 基于气象和水文模型耦合的水电站日径流预报[J]. 陕西水利, 2018(6): 26-28.
- [29] 王斌, 王贵作, 黄金柏, 等. 栅格分布式水文模型在高寒区日流量模拟中的应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 36-42.
- [30] 王栋, 魏加华, 章四龙, 等. 基于 CEEMD-BP 模型的水文时间序列月径流预测[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(3): 376-386.
- [31] 王亮, 朱仲元, 朝伦巴根, 等. 月尺度的协克立格模型在水文数据插补延长中的应用[J]. 水文, 2011, 31(5): 29-34, 67.
- [32] 郝莹, 马京津, 安晶晶, 等. 全球 1.5℃ 和 2.0℃ 升温下潮白河流域气候和径流量变化预估[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(3): 237-246.
- [33] TIAN W, LIU X M, LIU C G, et al. Investigation and simulations of changes in the relationship of precipitation-runoff in drought years [J]. Journal of Hydrology, 2018, 565(18): 95-105.
- [34] 刘春雨, 国庆喜. 小兴安岭典型集水区水文过程模拟研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 69-74.
- [35] 曲迪, 范文义, 杨金明, 等. 塔河森林生态系统蒸散发的定量估算[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1652-1660.
- [36] 朱丽, 秦富仓, 姚云峰, 等. 基于 SWAT 模型的华北土石山区流域不同水源涵养林类型的水文响应模拟[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 60-64.
- [37] 丁程锋, 张绘芳, 高亚琪, 等. 天山中部流域尺度森林变化水文响应定量分析——以乌鲁木齐河流域为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2034-2046.
- [38] HAGEMANN, CHEN S C, HAERTER J O. Impact of statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three gcms and two hydrology models [J]. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(4): 556-578.
- [39] 王佳佳, 殷坤龙, 杜娟, 等. 基于 GIS 考虑准动态湿度指数的滑坡危险性预测水文-力学耦合模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3868-3877.
- [40] 李月玉, 崔东文, 高增稳. 基于多组群教学优化的随机森林预测模型及应用[J]. 人民长江, 2019(7): 83-86, 91.
- [41] 柴颖. 基于随机森林回归分析的径流预报模型[J]. 水利水电快报, 2018, 39(9): 36-38.
- [42] 刘丽娟, 胥国盛, 葛建平. 岷江上游典型流域植被水文效应模拟[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 19-24.
- [43] 田富强, 胡和平. 水文模型中植被截留计算的误差分析[J]. 水利水电技术, 2006, 37(10): 1-2, 6.
- [44] 郑绍伟, 慕长龙, 陈祖铭, 等. 长江上游森林影响流域水文过程模拟分析[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 3046-3056.
- [45] 周方录, 黄金柏, 王斌, 等. 两种地形条件下小尺度流域降雨-径流数值模拟[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(9): 93-101.
- [46] 温熙胜, 何丙辉, 张洪江, 等. 三峡库区缓坡林地产流初探[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(5): 74-80.
- [47] NATARAJAN S, RADHAKRISHNAN N. Simulation of

- rainfall-runoff process for an ungauged catchment using an event-based hydrologic model: A case study of koraiyar basin in Tiruchirappalli city, India[J]. 2021, 130(1): 1-19.
- [48] HUGHES D, BIRKINSHAW S, PARKIN G. A method to include reservoir operations in catchment hydrological models using SHETRAN[J]. Environmental Modelling & Software, 2021, 138(80): 104980.
- [49] 杨振华, 宋小庆, 苏维词. 西南喀斯特地区坡地产流过程及其利用技术[J]. 地球科学, 2019, 44(9): 2931-2943.
- [50] 包红军, 王莉莉, 李致家, 等. 基于 Holtan 产流的分布式水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 340-346.
- [51] 李超群, 郭生练, 张俊, 等. 利用 Horton 下渗曲线改进 TOPMODEL 模型的基流模拟[J]. 水文, 2009, 29(1): 4-7, 20.
- [52] 王国庆, 王苗苗, 贺瑞敏, 等. 可变下渗容量模型及其在黄河流域的应用[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 397-402.
- [53] 邓慧平. 气温变化对西南山区流域森林水文效应影响的模拟[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 601-605.
- [54] 尹剑, 邱远宏, 张斌. 数据同化对流域蒸发过程模拟的影响研究[J]. 人民珠江, 2021, 42(2): 12-18, 24.
- [55] 王佳, 张新华, 雷晓辉, 等. 分布式水文模型对水质监测数据的补充及污染源分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 92-97.
- [56] 韩莉, 刘素芳, 黄民生, 等. 基于 HSPF 模型的流域水文水质模拟研究进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015(2): 40-47, 57.
- [57] NIYAZI B A, MASOUD M H, AHMED M, et al. Runoff assessment and modeling in arid regions by integration of watershed and hydrologic models with GIS techniques[J]. Journal of African Earth Sciences, 2020, 172 (103966): 1-16.
- [58] THAKUR P K, RANJAN R, SINGH S, et al. Synergistic use of remote sensing, gis and hydrological models for study of august 2018 Kerala floods[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 43(3): 1263-1270.
- [59] OMBADI M, NGUYEN P, SOROOSHIAN S, et al. Evaluation of methods for causal discovery in hydrometeorological systems[J]. Water Resources Research, 2020, 56(7): 1-38.
- [60] FIDAL J, KJELDSEN T. Operational comparison of rainfall-runoff models through hypothesis testing[J]. Journal of hydrologic engineering, 2020, 25(4): 1-10.
- [61] GAI L, NUNES J P, BAARTMAN J E M, et al. Assessing the impact of human interventions on floods and low flows in the Wei River Basin in China using the LISFLOOD model[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 653(2019): 1077-1094.
- [62] ZHANG D J, FU W J, LIN Q Y, ET AL. WOF-SWAT: A web-based open-source framework for investigating the hydrological impacts of climate change and human activities through online simulation and visualization of SWAT models[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(9): 1-19.
- [63] 白琪阶, 宋志松, 王红瑞, 等. 基于 SWAT 模型定量分析自然因素与人为因素对水文系统的影响——以漳卫南运河流域为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1575-1587.
- [64] WANG J, STERN M A, King V M, et al. PFHydro: A new watershed-scale model for post-fire runoff simulation[J]. Environmental Modelling and Software, 2020, 123(104555): 1-15.

Research Progress on Forest Hydrological Model

ZHANG Xin-sheng, LU Jie

(Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University/Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau, Ministry of Education/Linzhi National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Tibet, Nyingchi 860000, China)

Abstract: Forest hydrological model is built around the research content of forest hydrology. The model simulates the data needed in the process of forest hydrology, which can not only predict the future forest hydrological situation, but also supplement the historical incomplete hydrological data. In order to promote the protection and development of forest resources and water resources, this paper divided the model types by three methods, built the model around the five contents of Forest Hydrology Research (forest canopy interception, watershed runoff, soil water movement in forest land, forest evapotranspiration, and water quality), and further discussed the development prospect of forest hydrology model in the future. At present, there are two main problems in forest hydrological model: one is the lack of accuracy in model checking; Second, there is a lack of historical hydrometeorological data. Therefore, it is necessary to strengthen the research of forest hydrological model, determine the classification method of the model, improve the accuracy of the model, solve the problem of lack of historical hydrological and meteorological data, and further promote the development of forest hydrology.

Keywords: forest hydrology; hydrological model; classification method