

文章编号: 1001-8166(2001)03-0314-10

生态水文科学研究的现状与展望

王根绪^{1,2}, 钱 鞠^{1,2}, 程国栋¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:生态水文科学研究是区域生态系统研究和区域水文科学研究的交叉领域,其核心内容是揭示不同环境条件下植物与水的相互关系机理,探索各种植被的生态水文作用过程。近年来,生态与水文相互作用过程的数学模拟和专门模型研制日益成为重要的发展领域,同时,生态水文学的研究十分注重尺度效应,把在一定尺度上获得的水文与生态原理或模型向其它不同尺度转换已成为最具挑战性的问题。山地生态系统成为全球变化研究最为重要的研究场所,开展与全球变化相关的生态系统物质与能量循环、生态过程的梯度效应及其与水文过程的耦合关系、生态系统结构与功能及其变化等方面的研究,是生态水文学研究最具活力的方向,其中建立包含区域气候变化因素的多元生态过程动态模拟模型,并使该模型具有不同时空尺度、不同地貌和生态带的广泛适应性是目前广泛关注的热点问题。

关键词:生态水文学;生态系统;生态水文过程;生态水文模型
中图分类号:Q14;P343 **文献标识码:**A

1 关于生态水文学

生态水文学是 20 世纪 90 年代以来兴起的一门边缘学科,顾名思义,就是研究水文学和生态学两方面问题都涉及的科学。80 年代初期以来,水文学家越来越多地关注陆地景观中水与生态过程的相互关系。例如,过去水文学家在使用曼宁(Manning)一般水流方程时把河道中的植被往往仅做为特殊和粗糙系数来考虑。而现在,越来越多的水文学家关注水流速度如何影响河道内植被的生长以及河流状态与滨水植物生态过程的相互关系^[1,2]。生态水文关系在许多方面,甚至在所有生态系统中都很重要,这种联系不仅在湿地中非常重要,而且它们对森林和干旱区的生态系统也具有同样重要的作用,实际上近年来一个反映水文学家研究水文景观中植被作用的典型实例就是对森林蒸腾和降水截留的研究^[3,4]。这与相似,生态学家也普遍重视生态系统中水的储存与运移过程,从微观的个体植物生理水分与生长的关系

研究,发展到关注区域水文循环过程对植被群落演替与生态过程的关系研究。这样由于生态学与水文学的广泛交叉与相互渗透,逐渐形成了生态水文学。Hatton 等^[5]的广义生态水文学定义,是指在一系列环境条件下来探讨生态水文过程,它考虑了干旱地区、湿地、森林、河流和湖泊的生态水文过程。

在生态环境保护为当今社会所广泛关注的今天,人们越来越认识到与自然生态系统协调共处对人类可持续发展的重要性,在自然生态系统与人类的众多复杂关系中,水是最为活跃和最具决定性的纽带,水资源开发利用所导致的区域水文过程变化将不可避免的对区域生态环境体系产生影响,而区域生态环境变化,尤其是植被生态系统的变化,将势必对区域水文过程产生作用,这也正是水循环的生物学方面(BAHC)计划的核心所在^[6]。研究诸如此类有关生态圈与水文圈之间的相互关系以及由此产生的相关问题,就是生态水文学的内涵。

收稿日期:2000-07-18;修回日期:2000-11-09.

作者简介:王根绪(1965-),男,甘肃天水人,副教授,主要从事干旱区水资源与环境的教学、科研工作。E-mail,gxwang@ns.lzb.ac.cn

2 生态水文科学的主要研究内容

2.1 生态系统中植物与水的关系研究

生态水文学的一个重要研究领域集中于陆地和水生生态系统中植物与水的关系问题,根据陆地主要环境或生态系统类型,该问题可分为干旱地区、湿地、森林、河流和湖泊等5种类型环境或生态系统类型的生态水文分析。

2.1.1 干旱区的生态水文过程

水是干旱区关键的生态因子,植被的组成和结构由水密切控制,同时也在各种尺度上对水产生重要反馈。在较大的空间尺度上,干旱区地表的复杂性加剧了土壤—植被—大气传输之间联系的复杂性^[7],目前对干旱区气候变化模式和边界层动态的研究程度要远低于草地和森林系统^[8]。掌握干旱区气候与地表特性间反馈的重要意义不仅在于深入理解所含过程,而且对了解荒漠化、土地退化实际问题及其对区域和全球尺度的气候反馈具有重要作用。在较小尺度上,干旱区植被能够在所有时间尺度上以一系列复杂方式对气候变化进行响应。在区域尺度上,最近40年以来提出的干旱区产流及沉积物迁移一般模型具有显著的应用价值。然而,在小尺度上,详细描述各种植被群落、产流、侵蚀以及土壤营养成分之间的内部联系,对于获得可靠数据相对困难的干旱区生态水文过程而言,模拟是一种有利方式^[9],最近建立起来的PATTERN模型就提供了能较好预测未来干旱区环境变化的途径。在长时间尺度上,研究区域植被群落演替过程与气候以及其他环境变化的关系是生态水文学关注的焦点问题之一^[8]。

干旱区以降水贫乏且变异大为特征,干旱区植物具有适应这种环境与水分条件的特殊生态功能与生理机制,Evenari^[10]系统归纳了干旱区植物对荒漠环境的适应性,并把植物划分为“变水”植物和“恒水”植物两类,变水植物具有许多对极端干旱环境的生理适应性能,苔藓或地衣类植物是干旱区植物最典型的组成类型,但大部分荒漠植物属于恒水植物大类,可进一步划分为干旱胁迫一年生植物、干旱胁迫雨季生植物、多年生及双季性年内生植物等,这些类型都具有多种干旱适应性。分析干旱植物在水分胁迫下的群落组成结构、分布格局与演变过程,始终是干旱区生态水文科学研究的重点领域,但迄今关于这方面的研究未能取得突破性进展,尤其是群落演变的生态机理仍然处于未知阶段^[11]。近年来,关于干旱区植物分布如何影响径流和水分分布,以及

如何调节干旱区侵蚀等问题的研究受到广泛重视,同时,大尺度土壤—植被—大气传输(SVAT)相互作用以及干旱区植被随气候变化的演化也是目前生态学家与水文学家共同感兴趣的问题。

2.1.2 湿地植物与水的关系

水生生态学以湿地水文与生态过程以及二者之间相互关系的模拟为其主要研究内容,以至于狭义的生态水文学就以这种关系为其内涵所在。湿地水位如何影响植物的生长和生存、湿地水文运动过程对植被群落结构与空间格局的影响是湿地生态水文学主要的研究领域^[12]。Wheeler注意到水量以外的其它水分状况对植物生长具有同样重要的控制作用。尽管有大量证据表明水分影响植物生长,但是关于水位或水分状况与植物组成的清晰定量关系仍未建立。近来研究表明决定植被组成和水位关系的因素不仅包括水源、养分状况,也包括水分对湿地土壤氧化还原位的影响。随着全球变化问题日益引起全社会广泛关注,湿地生态系统在排放温室气体方面的作用逐渐引起人们的重视,研究湿地生态系统排放温室气体的规律及其影响因素,分析这种规律对区域或全球气候变化的影响,成为湿地生态领域日渐活跃的学科领域^[13]。由此形成湿地泥炭研究、湿地碳循环研究。湿地以其水陆交替的地貌特征,具有特殊的生态水文特征,最丰富的生物多样性和较高的生物生产力,而且因其对气候变化与人类活动影响的异常敏感性,成为地球上生态系统演变最为剧烈的场所之一^[14]。

2.1.3 森林水文生态作用及其环境效应问题

森林水文生态作用研究内容主要是以不同的时空尺度来了解和认识森林植被变化与水分运动的作用关系以及与之相伴随的生物地球化学循环、能量转换^[15,16]。森林水文生态作用研究强调了树木如何影响地表水运输以及如何通过蒸散作用影响土壤水分状况。现状研究动态可集中划分为3方面:①集水区森林水文生态作用研究。集水区具有明确的水文边界,作为水文循环与水量平衡研究的天然场所,在森林水文生态作用研究中占有重要地位。自70年代以来,研究内容从森林覆盖对河川流量的影响研究,发展到森林生态系统与水文过程的相互作用机理及其对大尺度干扰的响应过程,包括植被生态演化、土壤、河流化学与生物地球化学过程研究^[15,17]。但国内外对其核心问题——森林对集水区河川径流量的影响却始终没能取得统一认识,至今仍存在两种截然相反的结论:森林覆盖率增加,径流量减少^[18~20];

森林流域年径流量较无林或少林流域大^[14]。②水土保持森林水文生态作用研究。以研究森林对降水—汇流过程和土壤侵蚀过程的影响为主,从林冠截留、林地枯落物吸持水、林地土壤水分入渗与贮水以及林地蒸散发等水文平衡要素出发,系统研究森林水文生态作用过程,包括对不同气候带典型森林植被类型水文过程及对比研究。国内外这方面研究的量化程度较高,已能明确揭示不同树种对降水截留与吸持的比率;同时,对森林水文生态作用过程的不同阶段或全过程,已开发出许多数值模拟模型,如模拟林冠截留的 Rutter 模型、Massman 模型,模拟土壤水分过程的 Philip 模型、Hottan 模型以及许多径流模型等^[15]。但林地蒸散发的量化与模型化研究尚无显著的突破性研究成果。③森林水文生态效益研究。森林水文生态效益包括水源涵养效益、防洪效益、防止土壤侵蚀与减沙效益等。也是森林生态水文领域最早的研究问题之一。国内外提出了许多评价方法,如公益效能法、系统分析法、价值替代法等^[21,26]。

2.1.4 河流、湖泊系统植物与水的关系问题

植物通过对河道粗糙度和对河流水的摩擦而影响河流水力特性,水流状况又对河道内植物生存和生长有深远的影响。河流的生态水文过程长期以来都是河流管理与区域生态与环境保护的核心问题,近年来,将理论生态学应用于河流管理,以保护沿河生物群栖息场所的研究,营养物在河道、洪泛平原和河岸区内迁移规律研究,河流廊道对区域生物种群结构和空间生态结构的影响研究等都是十分重要的河流生态水文课题^[20]。干旱区内陆河流的开发利用引起的生态环境效应始终是人们关注的焦点,在这方面的研究中,已将河流水文过程、区域生态与环境过程和流域社会与经济发展过程紧密相联,从流域系统角度,建立目标决策模型,使生态、水文和经济相互耦合为统一的整体行为^[23,24]。在干旱内陆河流域,植被、土壤等的生态特征以及自然水环境随流域水分分布呈现显著的空间三向分异规律,这种规律可能对流域生态与环境的保护起着重要作用^[25,26]。

植物对湖泊水位的控制作用很大,这方面湖岸植被发挥着重要的作用^[27]。尽管浮游生物在开阔水域中能改变温度条件,影响蒸发、水分分层和水分混合的过程,但它们在湖泊盆地的水分重要性相对很小。事实上,湖边植被被蒸发要数倍于空旷水域的蒸发,它超过湖泊其它形式的水分损失,湖边水位消落也改变着地下水进出湖泊的格局。湖泊水文状况(水

位、水温、含盐量等)控制着湖岸植被类型、群落结构、空间分布以及演化过程,对沿湖分布的动物种群类型及其生活习性也起着决定性作用^[28,29]。

2.2 山地垂直梯度及其相关的流域源区的特殊水文与生态过程研究

山地面积占地球表面的 1/5,不仅提供 50% 以上世界人口的水源,而且是地球上绝大部分动植物的生息场所并具有丰富多样的生态系统,因此具有极其重要的资源与环境意义;但是正如联合国环境与发展大会(UNCED)1992 年颁布的《21 世纪议程》中所指出的:山地环境是全球生态系统所必不可少的重要组成部分,随着全球范围内经济社会的发展和人口压力加剧,其大多数正经历着诸如土地侵蚀加剧、物种与基因多样性迅速减少等严重的生态环境恶化过程,山地生态环境保护与资源和社会发展的合理化管理是目前迫切需要解决的核心问题^[30]。山地生态水文过程具有不同于其他地貌单元的特征:①具丰富多样的环境梯度特征,并由此形成明显的植被结构、组成与功能等方面的垂直带谱;②相对丰富的降水形成较大的地表径流,是区域地表河流的形成区,洪水期土壤侵蚀严重,水中泥沙含量较大,具有特殊的水文动态过程;③在山体上部一般具有冰川分布和永久性积雪覆盖^[6]。由此,不具有显著环境垂直分带的低缓山体和高原将不在此列。

全球变化是众多因素综合作用的结果,在这些因素中有些是人类活动间接作用的结果,例如区域气候要素的改变及紫外辐射强度的变化等,高山地区可能是唯一的或者至少是最佳的研究场所,尤其是高山地区所具有的陡峭山坡,形成了地球表面短距离的环境突变梯度,造就了独特的探索全球变化与区域生态环境间相互作用与反馈机制的研究条件。山区生物多样性沿高程梯度的自然变化直接引起生态和水文过程的空间分异,形成山区沿高程梯度的多种环境敏感带,包括有关生态的(即生态脆弱带)和有关水文的(冰川、积雪、冻融地带)两类,对监测全球变化具有重要意义。山地的高海拔地区,大多数情况下人类活动影响微弱,这些区域包括许多国家公园或自然保护区,呈现近自然状态,是研究自然因素影响环境变化,尤其是气候条件包括大气化学变化对区域生态环境影响研究的最佳场所^[6]。为此,自 1994 年以来 IGBP 及其核心计划 BACH 和 GCTE 相继开展了旨在推进山地研究的相关计划,联合国环境与发展会议提出了“管理脆弱生态系统——可持续的山区发展”,强调开展山地生态系统研

究的重要性和迫切性。近年来有关山区生态水文过程的研究归纳列于表 1^[6,31]。

在过去 20 年中,人们逐渐认识到陆面过程尤其是陆面植被生态过程对水文过程的重要性,也意识

表 1 山地垂直梯度特殊生态与水文过程及其相互关系研究的主要方向与目标

Table 1 The major directions and objects of study on the special ecology and hydrological processes and their interrelationship along altitudinal gradient in the mountainous region

研究方向与主题	主要内容	所要解决的问题
山地垂直梯度的生态与水文过程的监测与试验	迁移试验;气温、气压、CO ₂ 、UV-B 等要素变化对植被生态的影响; 定位试验;水分、土壤、积雪、养分等变化对植被生态的影响	山区生态过程对全球变化的响应特征;植被生态变化的水文效应;陆面能、水交换过程
山区生态与水文过程及其相互关系的时空变化,以及这种变化对气候和陆面特性的功效评价	流域源头集水区沿垂直梯度环境和土地利用变化对水文过程的影响或控制作用;水文过程改变对生物地球化学、植被结构、生物产出以及侵蚀和斜坡稳定性等的影响	山区环境要素与生物和水文过程的相互作用机制;沿垂直梯度生态系统及其过程变化与水文过程的耦合关系;在流域集水盆地或更大的区域尺度上气候要素的时空分布与变化对生态与水文过程的影响
山区生态系统结构、功能及景观动态过程变化分析与模拟	揭示生态系统结构与功能长期演变的生态斑块动态模拟模型;地形和陆面异质性对土壤水分、蒸发、产流及侵蚀等空间格局相互作用的模拟与评价;异质性景观动态变化过程分析与模拟	可应用于不同尺度和生态系统的描述生态结构与功能长期演变的模拟模型;水文过程、地貌特征以及气候变化影响下的异质性斑块动态变化过程与模拟;土地利用和其他干扰的景观生态响应;区域景观生态过程的定量化分析技术
区域气候和土地利用变化对山区水文与生态过程影响的数值模拟	改进高分辨率气候模型以用于山区气候要素空间分布格局的模拟与预报;基于水分、养分和沉积物沿垂直梯度向下迁移的数学模型,建立以地形特征为基础的空间综合分布模型	全球变化对未来山区降水/积雪和冰川影响的预测;不同植被生态(覆盖、种类、结构)对山区垂直梯度物质与能水迁移的影响与模拟;山区生态与水文过程耦合关系的综合模型

到生态与水文过程的耦合关系对全球变化的作用与响应在全球气候模式中的重要性,BAHC 和 GCTE 就致力于区域生态水文过程与全球变化研究,先后开展了一维 SVAT 模式的发展、陆面特征及通量的区域尺度实验和模拟、生态系统与水资源之间的反馈以及在控制碳、土壤、养分从陆地生态系统向水体的输送机制等方面的研究。在全球变化日益引起全社会广泛关注的情况下,由于山地及其相联的流域集水盆地所具有的特殊生态与水文过程及其对全球变化的高度敏感性,近年来山地生态系统日益成为关注的焦点。BAHC 和 GCTE 于 1996 年开始着手山区生态系统的梯度分异及其相关的流域水文研究,其目的在于明确认识全球变化对区域生态和水文过程的影响。

3 生态水文学研究的主要问题

3.1 生态水文过程的尺度问题

在某一尺度上十分重要的参数和过程在另一尺度上往往并不重要或是可预见的,尺度转换往往导致时空数据信息丢失^[32]。这种情况对所有地理和生

态科学,包括生态水文学都适用。事实上,尺度问题已成为日益壮大的环境科学研究的理论焦点,也被众多水文学家确定为首要研究的问题^[33]。根据 Kalma 等^[34]的观点,把水文定律联结到不同尺度上的问题至今尚未引起足够重视,成为陆面过程所遗留下来的最具挑战性的问题。有许多方面的原因促使目前不断认识到植物-水关系中尺度问题的重要性:首先,人口增加、科学技术进步和经济活动的发展不断扩大人类对于水文学系统的影响。水文学最初涉及生活与灌溉用水的社会供给的技术要求,包括废水处理和土地防洪等关注的是很小的尺度,但现在发展到与全球气候变化问题区域土地利用以及污染转移等相关的全球、区域尺度。其次,绝大多数气候、水文及生态过程都具有显著的时空异质性,但人类认知或模拟这些过程的能力受到技术、人力和财力,以及度量技术标准的普遍缺乏等的限制^[35]。同时,模拟又要求异质性参数如反射率或土壤水分特征等的长序列空间连续性表述,而且获取或掌握空间数据的遥感和其他新技术的发展加剧了这种需求。其三,生态水文学的理论和模型往往具有高度的

尺度特征,在某一尺度上构建的模型,一般不能移植到高一或低一级时间/空间问题中求解,这是因为主要过程在不同尺度上是不相同的,或者系统行为具有高度非线性化。

根据 Dooge^[36]的观点,水文学作为科学学科,在理论上跨度 15 个序列尺度(表 2),从水分子尺度(10^{-8} m)到全球水文循环的星球尺度(10^7 m)。实际上,水文研究习惯于流域尺度,或依 Dooge 定义的中尺度及大尺度中低阶部分。同样地,生态学家偏好于在“网球场大小”的现场进行生物相互作用的实验研究^[37]。无论生态学尺度还是水文学尺度都与气候学家所感兴趣的尺度截然不同,气候学家一般将 $500\text{ km} \times 500\text{ km}$ 网格用于他们的模型中。水文模型往往与较小空间尺度一次流域(甚至是高山-斜坡系统)尺度过程相联系,有时比一般循环模型(GCMS)所解决的空间尺度还要小,与之相反,GCMS 被熟练地用于解决陆面尺度上洪水动态问题,又同时用于区域和较小尺度过程的问题^[35]。按照 Hostetler^[38]的观察结果,无论是 GCMS 还是水文模型,其大部分参数误差产生于气候和陆面相互影响模型的界面尺度,由于气候模型中不确定成分如水蒸发和云雾反馈等的影响将更加剧了这种尺度敏感性和配置错误问题。另外,不匹配问题还由对气候变化模型输出的影响,尤其是潜在人类对水文和生态循环的作用研究意义更大^[39]。为了在气候、水文和生态模型之间建立尺度连结“桥”,既需要调查与反映格网尺度上异质性的方法,也需要在不同尺度之间连结参数状态的方法。

表 2 水文学中的空间尺度

Table 2 The spatial scales in hydrology

分 类	系 统	典型尺度大小(m)
	全 球	10^7
大尺度	陆 面	10^6
	大型流域	10^5
	小流域	10^4
中尺度	次流域	10^3
	流域组成	10^2
	元素值	10^{-2}
小尺度	连续点集	10^{-5}
	分子集群	10^{-8}

现在遥感作为常规技术,不仅为水文模型的参数校正、土壤水分与流量计算、实时洪水预报等提供数据,而且可用来定量 $10 \sim 30\text{ m}$ 尺度范围内的关键水文要素和水贮量平衡方程(即定量、蒸发量、

降水量、雪盖、径流量和土壤水分)。遥感方程所具有的这些能力使“大尺度水文学”的研究变得十分方便,“大尺度水文学”用来研究全球大气圈-水文圈-生物圈相互作用与反馈机制。如标准化差分植被指数(NDVI)被用来研究植被生物气候学和监测随降水改变或厄尔尼诺产生的干旱引起的整体陆面植被变化情况^[40];NDVI 还被用于作物监测以及作为主要的生物物理指标用于干旱与饥荒的早期预警系统,如世界粮农组织的全球预警系统(GEWS)。同时,GIS 和 DTM 为研究生态水文过程中尺度和异质性的效应问题提供了新的机遇。

近年来,对生态水文过程的尺度转换理论和研究方法取得了许多新的进展,最具代表性的是外推和缩微技术的应用。外推或“放大”技术基于这样一个基本假定,就是中等或次中等尺度上的原理和等式可用于描述较大尺度的过程,换言之,植物尺度上的经验关系适用于群落、嵌块和生物界尺度^[34]。但正如 Dawson 等^[39]指出的那样,在较高层次细化机制的过多信息可能是无效的,合并过多细节以及忽略某些方面往往对于搞清较高层面上的过程至关重要,这样较大尺度上响应的过程可能被噪声或无关联局部变种所掩盖。尽管如此,大多数直接放大法仍认为中尺度和次中尺度参数与较大尺度参数是相同的^[35]。Hatton 等^[5]提出了一个尺度转换理论,该理论通过生态场理论、水平衡理论和土壤-植物-大气连续体标准处理方法的结合。然而,运用该理论由单个树木耗水量来外推计算群落耗水量时需要多方面的假设条件,其中典型的条件有:假定单个树木叶面积/群落叶面积与所在场地水平衡之间存在显著的相关关系;每一棵树在其自身大小(叶面积)和环境之间趋于平衡,任何时间都不存在没有利用的剩余资源;以及群落中任何单个植物与其他植物间平行地相互作用,因此该理论的广泛应用受到一定限制。分形技术为解决在一定时空尺度范围呈现相似格局的表面上具复杂形式的问题提供了途径,许多自然分布都表现出统计的自相似特征,由此一个对象、形式或过程的次组织成分在统计上是无法与整体所区分的。但是,简单的分形特性很少在所有时间或空间尺度上应用^[34]。

国际地圈生物圈计划(IGBP)和全球能量与水循环实验(GEWEX)陆地尺度全球计划(GCIP)专门研究有关地球物理和生物组分间的相互作用及其对人类活动变化的响应,IGBP 核心计划之一的水文循环的生物圈方面(BAHC)的关键任务就是探索获

得高分辨率气象输入信息的途径或工具,以便在生态水文或森林空隙模型中使用。这种“缩微”技术可以进一步划分成4种方法,即:回归分析法、天气模式法、随机天气发生器以及有限单元模拟。但是,统计收缩技术在植物—水关系研究中的应用的确实度受到许多尚未解决的问题的限制,如大多数收缩方法所得出的以日为单位的时间系列仅限少数水文方面的参数,最为普遍的是降水,对内部连续的多变量数据的收缩需要在时间系列中保持变量间协方差和自相关的方法;另外,收缩是一个单一方向的模拟技术,中尺度预测因子的变化强化了区域和地方尺度水文或生态响应,现行技术无法将陆地反馈并入气候模型中^[35]。

在单纯水文过程的尺度转换方面,Williams和Sposito对描述非饱和层水分运动的理查兹(Richards)方程采用随机分析等手段进行了相似性研究,把微单元体内建立的微分方程应用在不同时空尺度上^[44]。刘新仁^[42]在新安江模型的基础上,建立了多重尺度系列化水文模型,在淮河流域上,对模型参数的地区化规律进行了研究。但由于水文变量时空分布的不均匀和水文过程转换的复杂性,该问题还远没有解决^[44]。

3.2 生态水文过程模拟研究与模型开发

广义地讲,生态水文模型就是任何可以用于生态水文研究的模型,比如Wassen等^[45]就利用地下水流模型(FlowNET模型)来确定进入或流出沼泽地带的水运动通道以更好地认识湿地植物种类的分

布规律。狭义地讲,在模型构建中,考虑生态—水文过程的一类模型就是生态水文模型。

(土壤—植被 SVAT 被—大气传输)模型就符合生态—水文模型,因为这些模型直接揭示植物如何影响地表表面水分散失速率,SVAT模型分多种类型,比较复杂的如SWIMV. 2. 1^[44],可解决4种植被类型、土壤中不同根系分布、多层结构土壤、Darcy-Richards型土壤水分与溶质传输等条件下的传输问题;还有其他一些用于简单SVAT和植物生长问题的生态—水文模型,如PATTERN模型等。然而,在绝大多数生态水文模型中,都存在水文次级模型或原本就基于水文模型,因此上述对广义和狭义生态水文模型的定义纯粹是一种人为区分。SHE模型可以处理流域水流过程所有方面的问题^[45],该模型也可视作分布式模型,流域可分解为许多格网,对每一个网格,所涉及的上述过程都可被模拟;该模型反映了生态水文学中典型的概化思想:为认识流域行为,将流域分解成物理的或过程的组成单元。目前,生态水文模型可以归纳为表3所示的几种类型。

在数学模拟研究和模型开发研制中,由于生态水文过程的复杂性,数值法占据主导地位,由此产生的模拟与预报精度始终是需要解决的关键问题^[5]。另外,由于绝大多数水文和生态过程的数学方程或物理定律都具有高度的尺度依赖性,在小尺度实验研究中建立起来的模型能否推广应用到大尺度问题上,是生态水文模型应用过程中需要解决的又一重大问题。

表3 部分生态水文模型及其应用领域

Table 3 Selected eco-hydrological models and their application field

模型类别	生态水文模型	应用领域
经验模型	Rutter模型、Gash模型、Dalton模型、DCA模型、回归模型、Philip模型	森林水文生态过程、植物水环境排序、预测与模拟植物对水文的影响过程
机理模型	Penman-Monteith模型、Horton模型、系统响应模型、透水系系数模型、Pattern模型、分布式水文模型、MARIOLA模型、FOREST-BGC模型	生态水文平衡要素测定、生态与水文耦合过程模拟与预测、植被的水文生态效应分析
随机模型	Monte Carlo模型、马尔可夫模型	水文与生态过程的随机性模拟、参数与要素模拟
确定性模型	Darcy-Richards模型、Boussinesque模型、Hagan-Poiseuille模型、Laplace模型、Manning模型	土壤水流、河川径流运动与土壤侵蚀、溶质迁移过程、植被对河川径流的影响
集总模型	SVAT模型、HYDROM模型、SWIMV. 2. 1模型、SHE模型、新安江模型、SCS模型、SPAC模型、系统动力学模型、HYDRROM模型等	土壤—植被—大气间物质能量传输过程,区域气候、径流、植被与土壤侵蚀之间的相互关系,不同自然条件下土壤水分、溶质传输过程,区域生态与水文耦合过程,流域水文循环与水文过程

4 生态水文学的发展趋势展望

人类对生态水文过程的影响正在引起全球范围的关注,正如 Vitousek 等^[46]指出人类活动已经改变了地球表面土地覆盖,减少了生物多样性,改变了水生生态系统(尤其是沿海地带),调节了多数的河流,改变了生物地球化学循环及土壤、水分和大气的组成。因此,任何对植物与水分关系的分析都应考虑到人类因子。水文学已有较长的理论和应用研究历史,是解决 21 世纪的许多大问题的有力工具。目前的挑战在于如何将同样的原理融入生态水文研究中,包括完整的大气—生物—水圈模型的开发及植物—水分—气候反馈机制的研究。

4.1 生态水文学实验研究

长期以来,河流集水区就被用作水文学研究的基本单元,对比集水区的概念被用在比较不同生态系统径流和水质的研究中^[47]。尽管这种长期的网络监测受到巨大支撑经费困扰,但集水区实验仍将被用来研究诸如水分循环的化学和生物作用、尺度改变引起的生态系统行为变化、地气相互作用及人类活动对水文的影响^[48]。

当然,也存在大量的有关实验设计和长期野外观测的实验结果能否适用于更大尺度的争论,也有争论说大多数的生态实验将自然界的因果关系探讨过于简化^[49]。弥补这种过于简化的方法是在实验设计中包括一些更复杂和更多的因果关系,以及建立足够多的研究重复以便能够进行统计检验。同时也需要大尺度上的生态实验,因为诸如运动、扩散和种间关系只有从大尺度上才能观测到。最近大多数实验研究都加强了国际间的合作,这不仅有利于重要实验的重复,也可能避免人力和物力的浪费,还可以对实验结果的普遍性进行检验。

4.2 大尺度生态水文学研究

虽然完整的野外和模拟实验为理论的建立和模型的检验提供了大量的机会,但是集水区尺度上的实验具有相对有限的样品容量,其结果在大尺度或全球变化研究中就存在数据能否适用的问题。因此,研究景观到区域尺度,或者区域尺度到全球尺度的植物与水关系已经更多地依赖并得益于遥感研究。在区域及其以上尺度,遥感平台对绘制有关水文和生态的表面变量有明显的优越性,例如,应用 NOAA/AVHRR 卫星测量可评价全球尺度上冠层的物候阶段,并据此发现植被演替节律对地球表面和大气季节性的能量和水汽交换有很强的控制作

用;同样用微波资料可定量地测量不同地貌和植被覆盖的土壤湿度条件^[50]。遥感可以提供生态系统到生物群落(1 m~1 km 分辨率)中有关群落结构和个体冠层的有价值信息(如叶和茎面积指数(LAI)和吸收的光合有效辐射量),这些对估计 CO₂ 和痕量气体交换是必需的,对碳、水和养分循环模型的建立也是重要的依据。在陆地到全球尺度上(1~4 km 数据分辨率),对全球生物地球化学循环、生态系统动态、能量、水分和 CO₂ 交换的研究都利用有效叶面积指数和植物功能类型等结构参数^[51]。

高分辨遥感资料对景观生态学(研究空间格局与空间过程相互影响)的理论形成和研究也非常重要^[52],空间异质性对生态系统功能有重要影响,如对种群结构和生态系统过程的影响。边缘效应如林缘主导着水分和能量交换,也改变着局地的和区域的气候^[53,54]。地球观测系统(EOS)探测到的洲际尺度地表变化可能对区域水文和生物地球化学循环过程有深远影响,一些典型的模拟实验都揭示出地表反射率、粗糙度和土壤特性改变后普通水文循环模式将发生显著变化(GCMs),然而大多数 GCMs 是模拟单一的或者上覆的土壤水文循环,而与侧流交换、地下水或对气候响应的地表植被的结合相对较少^[55],这将是未来生态水文过程模拟研究的发展方向之一。

海洋中包含大量的碳循环组分,产生的化学物质最终也影响全球水文气候,海洋中大多数生物活动都发生在<200 m 的海水表层中,其中浮游生物吸收 CO₂ 释放硫化物。大多数海水养分比例(有机碳:N:P)的变化是由于海水循环的变化而改变深海中碳的输出,从而对大气 CO₂ 浓度有潜在的影响。此外,微生物也调节着海洋中 N、P 循环,这种调节对这两种养分的人为输入很敏感,尤其在陆地和海洋交接地带^[55,56],所以生态水文学家对这方面的研究也应列入研究议程。

4.3 恢复生态水文学研究

目前对退化环境恢复的探讨主要依赖于对抑制因子的认识。利用人工干扰来加速自然演替和生态恢复过程可能需要几十年甚至几个世纪的时间^[55]。强调通过自然保护区和保留一定面积的未破坏生态系统对保持生物多样性的重要性是因为它们可以为退化景观的重建提供种质资源^[57],这实际上依赖于生态水文过程保护和调节,如果在深入了解和掌握生态水文关系功能的基础上,通过调节或自然恢复生态水文机理,生态恢复是可以成功的。今后应强调

在完整的集水区环境整治框架体系中进行生态水文调节的必要性,这是实现流域管理和可持续发展的重要途径^[55]。

参考文献(References):

- [1] Petts G E, Bradley C. Hydrological and ecological interactions within river corridors[A]. In: Wilby R L, ed. Contemporary Hydrology[C]. Chichester, Wiley, 1997. 241-271.
- [2] Petts G E, Maddock I, Bickerton M, et al. Linking Hydrology and Ecology, the Scientific Basis for River Management[M]. Chichester, Wiley, 1995. 1-16.
- [3] Divie T J A, Durocher M G. A model to consider the spatial variability of rainfall partitioning within deciduous canopy 1. Model description[J]. Hydrological Processes, 1997, 11: 1 509-1 523.
- [4] Divie T J A, Durocher M G. A model to consider the spatial variability of rainfall partitioning within deciduous canopy 2. Model parameterization and testing[J]. Hydrological Processes, 1997, 11: 1 525-1 540.
- [5] Hatton T J, Salvucci G D, Wu H L. Eagleson's optimality theory of an eco-hydrological equilibrium; quo vadis? [J]. Functional Ecology, 1997, 11: 665-674.
- [6] IGBP. IGBP report 43: Predicting Global Change Impacts on mountain Hydrology and Ecology[R]. 1997. 7-30.
- [7] Noilhan J, Lacarrere P, Dolman A J, et al. Defining area-average parameters in meteorological models for land surfaces with mesoscale heterogeneity[J]. Journal of Hydrology, 1997, 199 (3-4), 302-316.
- [8] John Wainwright, Mark Mulligan, John Thornes. Plants and water in drylands[A]. In: Baird A J, et al, eds. Eco-hydrology [C]. London, Routledge, 1999. 78-123.
- [9] Kirkby M J, Baird A J, Diamond S M, et al. A physically based process model for hydrology, ecology and land degradation interactions[A]. In: Brandt C J, Thornes J B, eds. Mediterranean Desertification and Land Use [C]. Chichester, Wiley, 1996. 303-354.
- [10] Evenari M. The desert environment[A]. In: Evenari M, et al eds. Hot Deserts and Shrublands[C]. Amsterdam, Elsevier, 1985. 1-9.
- [11] Jeltch F, Milton S J, Dean W R J, et al. Tree spacing and coexistence in semi-arid savannas [J]. Journal of Ecology, 1996, 84: 583-595.
- [12] Bryan D Wheeler. Water and plants in freshwater wetlands [A]. In: Baird A J, et al eds. Eco-hydrology[C]. London, Routledge, 1999. 128~157.
- [13] Lu Xianguo, He Yan, Yang Qing. The wetland carbon cycle and its significance in global change[A]. In: Chen Yiyu, ed. Wetlands Research in China [C]. Changchun, Jilin Science and Technology Press, 1995. 68-72. [吕宪国, 何岩, 杨青. 湿地碳循环及其在全球变化中的意义[A]. 见: 陈宜瑜主编. 中国湿地研究[C]. 长春, 吉林科学技术出版社, 1995. 68-72.]
- [14] Zhao Kuiyi. The wetlands bio-diversity research and sustainable use in China[A]. In: Chen Yiyu, ed. Wetlands Research in China[C]. Changchun, Jilin Science and Technology Press, 1995. 48-54. [赵魁仪. 中国湿地生物多样性的研究与持续利用[A]. 见: 陈宜瑜主编. 中国湿地研究[C]. 长春, 吉林科学技术出版社, 1995. 48-54.]
- [15] Wang Lixian, Xie Mingshu. The Hydro-ecological Benefit on Soil and Water Conservation and its Information System of Protective Forest in the Mountainous Region [M]. Beijing, Chinese Forestry Press, 1998. 1-19. [王礼先, 解明曙. 山地防护林水土保持水文生态效益及其信息系统[M]. 北京, 中国林业出版社, 1998. 1-19.]
- [16] Ma Xuehua. Forest Hydrology[M]. Beijing, Chinese Forestry Press, 1993. 11-39. [马雪华. 森林水文学[M]. 北京, 中国林业出版社, 1993. 11-39.]
- [17] Likens G E, Bormann F H, et al. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem[M]. New York, Springer-Verlag, 1996. 1-54.
- [18] Liu Shirong. The Regularity of Hydro-ecological Function of Forest Ecosystem in China [M]. Beijing, Chinese Forestry Press, 1996. 107-203. [刘世荣. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京, 中国林业出版社, 1996. 107-203.]
- [19] Whitehead P G, Robinson M. Experimental basin studies—an inter-national and historical perspective of forest impacts[J]. Journal of Hydrology, 1993, 145: 217-230.
- [20] Boon P J, Calow P, Petts G E. River Conservation and Management[M]. John Wiley & Sons, 1992. 2-18.
- [21] Sun Lida, Zhu Jinzhao. The Comprehensive Benefit Research and Assessment of Soil and Water Conservation Forest System [M]. Beijing, Chinese Science and Technology Press, 1995. 22-64. [孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价[M]. 北京, 中国科学技术出版社, 1995. 22-64.]
- [22] Xu Xiaoqing. Evaluation and Quantization of Forest Comprehensive Benefit [M]. Beijing, Chinese Forestry Press, 1992. [徐孝庆. 森林综合效益计量评价[M]. 北京, 中国林业出版社, 1992.]
- [23] Xu Xinyi, Wang Hao, Gan Hong, et al. The Theory and Methods of Macroeconomic Water Resources Planning in Northern China Region [M]. Zhengzhou, Huanghe Hydraulic Press, 1997. 130-232. [许新宜, 王浩, 甘弘, 等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M]. 郑州, 黄河水利出版社, 1997. 130-232.]
- [24] Xu Zhongmin. A scenario-based framework for multicriteria decision analysis in water carrying capacity [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(2), 99-106. [徐中民. 情景基础的水资源承载力多目标分析理论及应用[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 99-106.]
- [25] Wang Genxu, Cheng Guodong. The ecological significance and functions of hydrology in arid area of China [J]. Environmental Geology, 1999, 39(3).
- [26] Andrew R G Large, Karel Prach. Plants and water in streams and rivers [A]. In: Baird A J, et al, eds. Eco-hydrology [C].

- London, Routledge, 1999. 237-258.
- [27] Abtem W. Evapo-transpiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida [J]. *Water Resources Bulletin*, 1996, 32: 465-473.
- [28] Chen Guichen, Peng Min, Zhou Lihua, *et al.* Relationship between ecological environmental change and human activity in Qinghai lake region, a preliminary study [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1994, 13(2): 44-49. [陈桂霖, 彭敏, 周立华, 等. 青海湖地区生态环境演变与人类活动关系的初步研究 [J]. *生态学杂志*, 1994, 13(2): 44-49.]
- [29] Bandyopadhyay J, Rodda J C, Kattelmann R, *et al.* Highland water—a Resource of Global Significance [M]. *Carnforth, Parthenon*, 1997. 131-156.
- [30] Wetzel R G. Plants and water in and adjacent to lakes [A]. In: Baird A J, *et al.*, eds. *Eco-hydrology* [C]. London, Routledge, 1999. 270-292.
- [31] IGBP. IGBP Report 47, Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC) Implementation [R]. 1998. 3-56.
- [32] Turner M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns [J]. *Landscape Ecology*, 1990, 4: 21-30.
- [33] James L D. NSF research in hydrological sciences [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 172: 3-14.
- [34] Kalma J D, Sivapalan M. Scale issues in Hydrological Modelling [M]. Chichester, Wiley, 1995. 71-88.
- [35] Robert L, Wilby, David S Schimel. Scales of interaction in eco-hydrological relations [A]. In: Baird A J, *et al.*, eds. *Eco-hydrology* [C]. London, Routledge, 1999. 39-66.
- [36] Dooge J C I. Hydrology in perspective [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1995, 33: 61-85.
- [37] Root T L, Schneider S H. Ecology and climate, research strategies and implications [J]. *Science*, 1995, 269: 334-341.
- [38] Hostetler S W. Hydrologic and atmospheric models, the problem of discordant scales [J]. *Climate Change*, 1994, 27: 345-350.
- [39] Dawson T E, Chapin F S. Scaling Physiological Processes, Leaf to Globe [M]. New York, Academic Press, 1993.
- [40] Anyamba A, Eastman J R. Interannual variability of NDVI over Africa and its relation to El Niño/Southern Oscillation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1996, 17: 2 533-2 548.
- [41] Garrison Sposito. Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology [M]. Cambridge, Cambridge University Press, 1998. 6-31.
- [42] Liu Xinren. Discussion on the several problems of macroscale hydrological modeling [A]. In: *Study on Energy and Hydrological Cycle in Huaihe River Valley* [C]. Beijing, Meteorology Press, 1999. [刘新仁. 大尺度水文模拟若干问题的探讨 [A]. 见: *淮河流域能量与水文循环研究* [C]. 北京, 气象出版社, 1999.]
- [43] Wassen M J, van Diggelen R, Wolejko L, *et al.* A comparison of fens in natural and artificial landscapes [J]. *Vegetation*, 1996, 126: 5-26.
- [44] Verburg K, Ross P J, Bristow K L. SWIMV2. 1 User Manual, Divisional Report of the CSIRO Division of Soils No. 180 [R]. 1996.
- [45] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, *et al.* An introduction to the European Hydrological System—structure of a physically based, distributed modelling system [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87: 61-77.
- [46] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J. Human domination of Earth's eco-system [J]. *Science*, 1997, 277: 494-499.
- [47] Burt T P. Long-term study of the natural environment—perceptive science or mindless monitoring? [J]. *Progress in Physical Geography*, 1994, 18: 475-496.
- [48] Farrell D A. Experimental watersheds, a historical perspective [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50: 432-437.
- [49] Roush W. Wen rigour meets reality [J]. *Science*, 1995, 269: 313-315.
- [50] Moulin S, Kergoat L, Viovy N, *et al.* Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10: 1 154-1 170.
- [51] Asner G P, Braswell B H, Schimel D S, *et al.* Ecological research needs from multiangle remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 63: 155-165.
- [52] Pickett S T A, Cacanasso M L. Landscape ecology, spatial heterogeneity in ecological system [J]. *Science*, 1995, 269: 331-334.
- [53] Xiao Duning, Li Xiuzhen. Development and prospect of contemporary landscape ecology [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(4): 356-364. [肖笃宁, 李秀珍. 当代景观生态学的进展和展望 [J]. *地理科学*, 1997, 17(4): 356-364.]
- [54] Xiao Duning, Bu Rencang, Li Xiuzhen. Eco-space theory and landscape heterogeneity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 453-460. [肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性 [J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 453-460.]
- [55] Baird A J, Wilby R L. *Eco-hydrology* [M]. London, Routledge, 1999. 355-358.
- [56] Cornell S, Rendell A, Jickells T. Atmospheric inputs of dissolved organic nitrogen to the oceans [J]. *Nature*, 1995, 376: 243-246.
- [57] Dobson A P, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future, restoration ecology and conservation biology [J]. *Science*, 1997, 277: 515-522.

CURRENT SITUATION AND PROSPECT OF THE ECOLOGICAL HYDROLOGY

WANG Gen-xu^{1,2}, QIAN Ju^{1,2}, CHENG Guo-dong¹

(1. *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. *School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The ecological hydrology is a science related to the overlapping parts of the ecology and hydrology. Eco-hydrology focuses on studying the relationship between vegetation and water under various environmental conditions and revealing the eco-hydrological processes of different plants. In recent years, the development of mathematic models which would be used to model the re-actions between plants and water and other eco-hydrology models are becoming the important fields in eco-hydrology. Besides that, the scale is becoming the seriously problem. Transforming the hydrological and ecological principles and functions obtained in one scale to the other scales could be the most challenge problem in the future. Recently, with the development of researching in the material and energy circulation related to the global change in ecological system, study in hydrological and ecological processes and their interaction along altitudinal gradients and the structure and functions of a ecological system, more and more attentions were paid to the mountain ecological system. During those disciplines, one of the most vigorous fields is to study and develop the multi-element dynamic models containing regional climate changes, and make the models have the effectiveness in different scales and various topography or ecological zones.

Key words: Eco-hydrology; Ecological system; Hydrological processes; Eco-hydrological model.