

生态水文学近 10 年研究进展

楚 贝¹, 胡世雄^{2,3}, 蒋昌波^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 东斯特劳兹堡大学, 东斯特劳兹堡 18360; 3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410076)

摘要:生态水文学,作为水文学和生态学交叉的一门边缘学科,是研究水文过程如何影响生态格局以及生态动力变化如何反作用于水文过程的交叉学科。随着淡水资源短缺逐渐成为全球性问题,生态水文学方法成为水资源可持续发展的科学指导依据,其研究也越来越受到重视。介绍了学科定义及国际研究计划和特点,主要从两个方面总结了近 10 a 生态水文学的研究进展:① 生态水文学近年来的主要研究内容及成果;② 生态水文学的研究热点及未来发展方向。

关键词:生态水文学;生态过程;生态系统;生态修复

中图分类号: X171 **文献标志码:** A

1 研究背景

生态水文学(Ecohydrology)是水文学与生态学相互融合形成的新型边缘交叉学科,其主要研究内容包括水文过程如何影响生态格局以及生态动力变化如何反作用于水文过程,即水文过程与生态动力格局的耦合关系^[1-2]。

D. Harper 和 M. Zalewski 对生态水文学给出了较为完整的定义:“通过对流域内水文机制对生物区以及生物区对水文机制的双向调节的量化与模拟,认识二者变化与协同的整体性,以保护、增强或修复流域生态系统的可持续利用能力为基本目标,缓解人类活动对流域的负面影响。”^[3]

当今有许多国际研究项目通过合作研究流域生态水文过程,比如,主题为“资料缺乏地区的水文预测(PUB)”的国际水文科学协会(IAHS)“国际水文十年计划”,国际地圈生物圈计划-水循环的生物学方面(BAHC)、联合国教科文组织国际水文计划(UNESCO-IHP)等。通过这一系列项目的实施,生态水文学的研究逐渐成为近 20 a 来流域科学的研究热点之一。

自 1965~1983 年实施第一个十年计划以来,国际水文计划(IHP)至今已经完成了 6 个阶段的研究计

划,其中,IHP 第五阶段(V2.3,2.4,1996~2001 年)重点强调了对生态水文学的研究,第六阶段(2002~2007 年)由 5 个主题组成,其中主题三的陆地生境水文学仍然是生态水文学的核心内容。目前正在进行的第七阶段(2008~2013 年),主要是就如何利用现有科学知识来发展新研究方向和方法,以对环境变化、生态系统和人类活动作出响应。第七阶段共包括 5 个主题下的 18 个重点研究领域。其中,主题三为面向可持续性发展的生态水文学。IHP 的这一系列阶段计划,充分反映了国际水文学和生态学方面最新的研究趋势。

2004 年在巴黎联合国教科文组织(UNESCO)总部召开的联合国教科文组织国际水文计划第 16 届政府间理事会的第 12 项决议通过了建立区域生态水文中心以及区域干旱中心,表明生态水文学的研究体系正在逐渐完善起来,并推向全球的各个角落。

2007 年,P. J. Wood 等就 2006 年及以前的生态水文学相关研究领域的研究进展进行了较为系统的总结,包括对基础生态水文/水文生态过程及响应的理解,动植物群和生态功能是如何受影响并对水及有效性作出反应的;分系统详细阐述了最新的研究方法,包括对生态水文/水文生态格局与过程进行监测和模拟,维持与保护其自然环境,确保人类对水的可持续利用;

最后还介绍了全球水文生态和生态水文的一些重要案例。所以本文在这些基础上更着重收集了过去 10 a, 尤其是最近 5 a 的一些主要研究成果, 总结生态水文学研究特点和进展。

2 近 10 年来研究的特点

随着研究工作的不断深入, 科学界逐渐发现生态水文学是一门弹性极大、研究内容极广的学科。作为一门连结生态学和水文学的交叉学科, 将环境科学的不同分支联系起来^[4-7]。近 10 a 来, 生态水文学研究特点也发生了较大变化, 表现为: 对于生态水文学, 不仅在以流域为基本单元的基础上开展了大量的研究, 也从大尺度(全球尺度)和小尺度(微生物)的级别分别研究了水文系统与生态系统的耦合以及探寻生物个体的水质代谢过程^[8], 同时, 对于生态水文过程的机理也进行了更加深入的分析。对于研究范围来说, 从最开始局限于水生生态系统, 到逐渐转向陆地生态系统, 特别是近几年对于脆弱地区, 如干旱地区、高山地区等, 生态水文学专家都给予了极大的关注。研究尺度上, 生态水文学越来越重视全球变化下的生态水文整合研究; 对于研究对象来说, 生态水文学逐渐从“蓝”水(blue water)研究转向探索性的“绿”水(green water)的研究, 生态需水量的计算越来越受到人们的重视; 对于水资源的研究, 则逐渐开始强调水的资源属性, 即强调人类活动的影响, 包括土地利用和植被覆盖对于生态水文过程的影响等。

3 研究进展、热点及展望

3.1 研究进展

生态水文学的发展经历了 3 个主要阶段^[9]: 学科孕育阶段(20 世纪中叶至 90 年代)、概念提出和初期的探索阶段(20 世纪 90 年代中期)和以实践为基础的生态水文学理论探寻阶段(20 世纪 90 年代中期以后)。2001 年之前的生态水文学, 总体来说, 都是侧重于水文过程水文格局变化所产生的生态效应及模型研制方面的研究。近 10 a 来, 国际生态水文学专家围绕以下几个方面开展了一系列的研究, 其研究主要成果可以概括为以下几个方面。

3.1.1 生境生态水文学研究

R. J. Naiman 等认为, 从水生生态系统和陆生生态系统的不同视角, 可将生态水文学研究主要分为两大块: 水生-生态水文学(Aquatic-Ecohydrology)和陆生-生态水文学(Terrestrial-Ecohydrology)^[10]。其中, 水生-生态水文学主要研究水文、水生生态系统过程及

水生生物群落, 而陆生-生态水文学被看成是水文学的分支学科, 生物过程包含于水文循环之中。水生生态系统主要包括湿地生态系统、河流生态系统、湖泊生态系统等, 陆生生态系统的研究则以干旱地区、森林、草原为研究重点。近年来, 河口海岸带的研究逐渐受到生态水文学家的重视。早期生态水文学的研究主要集中在湿地生态系统(包括湿地、沼泽、泥炭地等)。在水文机制变化下的响应, 通过对湿地生态系统生态水文学原理的分析推动了生态水文学的初步发展, 由于湿地作为地球之肺的巨大生态功能和对全球变化的敏感反应, 因此现阶段作为一个相对独立的生态系统, 仍然受到人们的广泛关注。很多学者在已有研究成果的基础上, 分析了湿地未来的研究重点和研究方向。

3.1.2 生态水文过程研究

对于生态水文过程的理解是生态水文学作为水资源和自然生态系统可持续发展的管理工具的关键。近年来生态水文学的一个重要研究方向就是探讨生态水文过程耦合。生态水文过程耦合是指水文过程与生物动力过程之间的相互作用机理和功能关系, 它包括生态水文物理过程、生态水文化学过程及水文过程的生态响应。具体研究内容主要包括以下几个方面: 土壤水动力研究、水质研究、植被模拟以及气候变化对生态系统的影响研究、土壤-植被相互作用研究等。

(1) 物理过程。生态水文物理过程主要是指全球变化(气候方面, 譬如降雨、CO₂ 浓度、气温), 土地利用与覆被变化下的水文响应, 主要包括以下几个方面的研究: ① 气候变化影响。根据 2001 年政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估, 21 世纪由于人类活动影响全球地表温度将增加 1.4℃~5.8℃, 气温、降雨、蒸发、风速以及太阳辐射都将随着大气化学成分改变而发生波动, 气候变化将导致极端天气的波动。而全球气候变化对水文和生态系统的影响主要体现在对水资源量和水质的影响上, 它将影响水文循环, 改变河川径流, 影响水在水库中的滞留时间以及水体中的水位, 由此引起洪水和干旱峰值和强度的变化, 并最终引起整个生态系统的变化, 从而带来一系列经济和社会问题。因此, 气候变化逐渐成为近些年生态水文物理过程研究的一个重要方面。② 覆被和土地利用影响。植被覆盖变化对水文过程的影响是近年来生态水文物理过程研究的一个重要方面。覆被能从多个层次上影响降雨、径流和蒸发, 对水资源进行再分配从而影响水文循环全过程。植被除了能影响水资源分配之外, 在沉积物的滞留方面也起到重要作用, 通过拦截径流, 植被能有效地保持水土, 防止土壤的流失, 而植被对土壤的控制效果主要取决于植被体系和性能特点。然而,

也有学者研究结果表明,沉积效率与植被类型关系不明显。土地利用的变化也会引起径流、蒸发量发生相应变化。陈军锋等模拟了梭磨河流域 4 种不同土地覆被情景下的多年降水径流蒸发关系,定量评估了土地覆被变化对径流、蒸发和洪峰流量的影响^[11]。研究表明,随着土地覆被状况由无植被覆盖到有林地覆盖,径流深减小,蒸发量增加,枯季径流深减小幅度明显小于雨季的减小幅度,而且雨季初期径流深减小的幅度大于雨季后期。土地利用的另一个重要的生态水文影响体现在土壤流失的问题上,土壤流失往往导致土地的退化和荒漠化。很多研究认为,土地利用的改变是沟渠侵蚀的一个主要原因,甚至超过了气候变化的影响。沟渠侵蚀具有普遍性,大量地区都发生着此类侵蚀,包括荒地、山区和丘陵地区、黄土区、管道和隧道带来的土壤侵蚀,但因其复杂的特性和研究的困难性往往被忽视。近年来,沟渠作为沉积物的一个重要来源,受到了国外许多相关方面研究人员的重视。

(2) 化学过程。流域尺度上生态水文化学过程研究主要是研究流域水文过程、生态格局变化对水质的影响,即水质性研究,包括营养物质的迁移和转化规律研究、景观格局变化产生的水质污染和水生生态系统对水质污染的响应研究等。

黄奕龙等认为近年来生态水文化学过程研究主要集中在 3 个方面^[12]:① 景观格局与营养负荷;② 水文格局的化学效应;③ 生态流量。纵观国外学者近几年的实验研究,具体研究领域大致集中在 3 个方面:① 生态毒理学研究。生态毒理学研究的是有毒物质进入环境对组成生态系统的生物种群和生物群落所产生的生态效应。主要研究内容包括陆地、淡水、海洋与河口生态系统的毒物毒性作用原理,毒物在迁移、转化、归宿过程所发生的特性变化,生物富集及不同水平的生态毒理学效应等,包括植物、动物与微生物生态毒理学。② 湖泊富营养化研究。流域中氮(N)、磷(P)是湖泊富营养化的主要原因,其迁移富集受到了生态水文学家的高度重视。流域中氮的滞留量的主要驱动力受到了密切关注。③ 利用生态系统结构和功能评估水质状况。评估一个生态系统的物理、化学和生物的完整性可以判断一个水体的整体功能水平。近年来,运用生态系统结构(主要包括大型无脊椎动物群体和初级生产者)和生态系统功能(叶腐烂和开放水体的新陈代谢)来评估水体水质成为水质研究的一个重要方向。

(3) 生态效应。水文过程的生态效应主要是研究水分行为对植被生长和分布的影响,主要研究内容为气候-土壤-植被三者相互作用。土壤水是土壤与植

被相互作用的桥梁,土壤水的含量基本决定了植被的生长情况,土壤水限制往往是导致植被受到水胁迫的重要原因,当土壤水达到限制时,将暂时或永久地破坏植被的组织生长。当土壤水未达到水阈值时,植被水压力将增加,植被受到水压作用而获取生长所需要的水分,反之,植被水压减小将不利于植物生长。

3.1.3 生态水文修复

生态水文修复作为生态环境恢复的一种有效措施逐渐受到重视,生态水文学者对生态修复原理和措施进行了不断探索。富营养化研究是水质研究中一个重要的方面,国内对这方面的研究非常重视。许多学者从运用湿地、冲击平原对生境进行重塑方面开展了一系列研究,这方面的研究内容主要包括:① 湿地的生态修复功能。天然湿地的类型主要包括以下几种:沼泽,湿地,泥塘,湿草地,泥潭。各种类型的湿地在植被类型、水分和地质条件方面都有很大的区别,但它们在生态修复方面的作用原理几乎相同;利用其缓慢的流速,使沉积物得以有效沉积,并且这种缓慢的流速能增加污水与湿地的作用时间,从而有效改善水质,而湿地中大量的微生物的生命过程需要以氮和磷作为燃料。利用这一原理,人工湿地通过模拟天然湿地地球物理化学和生物过程可以处理污水中的 BOD、固体悬浮物、氮、磷、碳氢化合物甚至金属等,从而有效改善水体富营养化和其他水质问题。② 冲击平原的生态修复功能。在植被对于河岸地形的塑造方面,学者也做了许多研究,河岸植被能影响造成河岸后退的所有过程,河岸植被改变河岸土壤水含量、温度机制,从而影响了陆面过程。一系列的研究实践表明,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,生态水文修复是可以成功的。

3.1.4 生态水文模型与遥感技术

基于生态响应的生态水文模型研究是生态水文学研究的另外一个重要内容。生态水文模型是揭示生态水文过程的模型,通过生态水文模拟,可以定性分析生态水文响应的变化并进行定量研究。从各种生态水文模型的组成模块来看,其主要原理都是将生态系统过程耦合入传统的水文模型中。目前用于生态水文过程研究的生态水文模型可分为以下几种类型:① 经验模型。是基于大量数据资料的统计分析结果。该类模型主要有 Rutter 模型、Gash 模型、Dalton 模型、DCA 模型、回归模型、Philip 模型,主要用于森林水文生态过程模拟、植物水环境排序、预测与模拟植物对水文的影响过程;② 机理模型。主要有 Penman Monteith 模型、Horton 模型、Pattern 模型、系统响应模型、透水系数模

型、MAROLA 模型、FOREST - BGC 模型等。用于进行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等;③ 随机模型。主要有 Monte Carb 模型,马尔可夫模型等,用于进行水文与生态过程的随机性模拟、参数与要素模拟;④ 确定性模型。包括 Darly - Richards 模型、Manning 模型等。该类模型主要用于模拟土壤水流、河川径流运动与土壤侵蚀、溶质运移过程、植被对河川径流的影响等;⑤ 集总模型。比较著名的有 SVAT 模型、SWIMV2.1、SHE 模型、新安江模型等。该类模型主要用于进行土壤 - 植被 - 大气间物质能量运输过程分析等。总体来说,生态水文模型的框架已经基本形成,模型未来的发展方向应该是放在模拟尺度及精度的提高上。

国外在生态水文学模型的应用方面已经较为成熟,在国内,除以上生态水文模型的应用之外,还将生态水文模拟系统 EcoHAT 应用于黄河流域、贵州省酸雨区域、北京官厅水库。结果表明,该系统能有效模拟和分析区域生态水文过程,为流域综合水资源管理提供技术支持。杨大文从研究水文空间尺度问题入手,成功建立了大尺度网格型分布式水文模型^[13],提出了不同时间尺度的水文模拟对空间尺度的要求,在此基础上提出的大尺度网格内的地形参数化和植被分类方法,较好地解决了模型的尺度问题,从而为生态水文模型的水文子模型建立提供了方法和思路。

随着遥感与地理信息系统的应用,生态水文模型与 GIS 的集成成为了生态水文模拟的主要方面。现有 GIS 与水文模型有 4 种集成方式:将 GIS 的功能嵌入到水文模型中、将水文模型嵌入 GIS 软件包中、松散关联型、紧密关联型。同时,GIS 与水文模型集成的发展方向应是如何在特定的时空尺度上将水文过程表达出来,从而将系统提高到一个新的概念化水平。

综上所述,生态水文学包含了很多相对集中的研究、分析和管理领域,按照研究的性质主要包括 3 种领域:① 研究将水文系统、物理、生物及社会经济体系宽泛整合到水资源可持续发展之中;② 强调生境中水的重要性,重点考虑水、土壤、植被的相互关系,包括土壤水变化对植被的影响以及植被对水循环产生的作用;③ 对河道和流量的研究,其中,水文过程的变化对水生生态系统的影响是分析研究的重点,也即水文 - 生态。

3.2 研究热点及展望

3.2.1 研究热点

由于还存在以下主要未解决的问题,生态水文学

的发展受到了一定的阻碍,这些问题的解决方法也是生态水文学未来的研究热点:

(1) 生态水文过程的研究。生态水文过程的模拟研究是近 20 a 来国际生态水文学研究的一个重要方面。在我国,生态水文过程的研究在近 10 a 才得到逐步重视。对于流域生态水文过程的模拟研究有助于更客观地解释流域内的生态与水文相互作用模式。随着一系列国际水文项目的推进,这些项目大多涉及脆弱环境下(如山地、旱地等)生态水文过程研究和控制,生态水文过程研究得到迅速的发展和广泛的重视,成为当前生态水文学的研究热点。

(2) 生态水文模型。现有的许多生态水文学模型往往将水文学作为其子模块单元,再耦合其他模块,包括生态学、植物生理学、土壤学、气象学和自然地理模块等。如何将水文学模块和生态学模块以及其他模块进行一体式紧密耦合,从而能进行高精度模拟和中长期预测,是现阶段生态水文学研究热点。随着 RS 技术的发展,为现场实测和模型检校提供了便利,利用全球大气和水文循环模型来预测流域尺度的水文过程成为主要研究方向,但研究表明,其无法准确预测流域尺度的水文过程。一方面是由于缺少高分辨率的空间遥感数据,另一方面是由于缺少与遥感数据相匹配的地面观测数据,这在很大程度上影响了遥感数据在水文模块中的应用效果。因此,如何提高模型的时空分辨率成为生态水文研究中又一重大课题。另外,随着地理信息系统技术的应用,通过其中专题地图可视化效应,使生态水文学的应用成果更易于被非专业人士接受,从而有利于不同学科之间的交流,也推动了生态水文学模型的发展。

(3) 尺度问题。尺度问题是水文学和生态学研究以及它们之间的耦合研究过程中最大的障碍,尺度研究也是国际上生态水文学研究的前沿性课题和热点。目前很多研究都是基于小尺度的集水区生态水文变化机理,而随着一系列全球问题的出现,基于小尺度数据进行的研究已无法满足对宏观尺度把握的要求,而简单外推又往往存在着失真的情况,这就要求我们将研究尺度推广到更大的区域,甚至全球。在生态学和文学交界面的耦合上,气候学专家研究的区域往往大于水文学家的研究尺度,如何进行各种学科之间的尺度匹配,成为了当前生态水文学的难题之一。

(4) 生态水文修复。在决策理论中,每个成功的决策都包括两个元素:减少危机和增加机会^[2]。解决目前环境恶化的一个重要方向为生态水文修复。通过生态水文学研究,了解其历史生态过程与不同生态演变时期的生态状况及其影响因子,得到生态状况与影

响因子之间的统计规律。杨国宪提出利用 RS 技术和 GIS 空间叠加功能对生态状况与影响因子进行一—时空叠加分析^[14],从而提出具有可操作性的生态修复技术对策。通过自然界生态系统本身结构的稳定性,来实现生态系统的自我修复是生态水文修复的有效方式。对于我国来说,生态水文修复的重点区域是西部地区。通过生态需水量的研究,可以通过构建稳健的生态水文系统来达到西北生态水文系统的平衡,从而实现其自我修复。

3.2.2 展望

(1) 通过水文过程的生态响应过程、模式、机理与效应以及生态系统的反馈调节更完整全面的研究,充分了解生态水文过程的作用机制和机理,从而有效预测生态水文过程(如土地利用和覆被情况)变化可能带来的后果,更好地指导生态水文修复。

(2) 在建模的数据资料获取方面,应加强更加系统的、全面的、大尺度的实时数据监测和数据收集,提高数据获取仪器(RS等)的空间分辨率,建立高精度和高准确性的生态水文模型。

(3) 在生态水文学的应用方面,加强生态需水的研究。生态需水,其实质是生态系统结构、功能、水分之间的相互关系问题。目前国内有关生态需水的研究是在现有生态系统和生态水文条件下进行的,其研究方法也形式多样,还没有形成一套成熟统一的生态需水量计算体系。在未来的研究中,应在充分考虑生态系统与水文过程相互耦合作用的基础上,基于严谨的植物生理学、生态学和物理学理论及定量的数学方法,建立一套完整的基于不同生境、不同物种的生态需水计算方法体系,为生态修复提供良好的决策支撑。

(4) 随着人类对海洋资源的开发,对于近海生态水文系统的研究将成为一个发展趋势,通过对海洋生态水文机制的了解,人类能够可持续性地开发海洋资源,使之为人服务。

4 结论

生态水文学,作为于环境有利、经济可行、社会可接受的水资源可持续发展决策管理工具,其研究已经受到生态水文学专家的高度重视。在生态水文学基础理论体系建立方面,由于生态水文学研究的时空领域范围极广,研究内容也极富弹性,对于生态水文过程机理的研究还不成熟和充分,处于理论探索阶段,目前尚没有一套完整的、全面的生态水文学理论体系。在现场试验方面,研究侧重于局部地区(集水区和流域)的

试验研究,而更大尺度(全球尺度)的研究,往往由于数据资料的不完备和现有技术的制约,遇到了一定的阻碍。在模型的建立和模拟方面,全球大气-生物-水圈一体化耦合模型的开发是生态水文学必然的走向,另外,模型的精度提高则依赖于 RS 技术空间分辨率的进一步提升。对于国内而言,生态水文学研究多侧重于实际环境需求方面,比如水土保持、富营养化问题、荒漠化、土地沙化等,关于干旱引起的一系列问题的研究则走在国内生态水文学研究的前列,相信随着这一系列紧急问题的妥善处理,利用生态水文学原理维持生境的和谐和生物多样性将成为国内生态水文学最具价值的研究用途。

参考文献:

- [1] Ingram, H. A. Ecohydrology of Scottish peatlands [J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1987, 78(4): 287 - 296.
- [2] Zalewski, M., Janauer, G. A., Jolankai, G. Ecohydrology: a new paradigm for the sustainable use of aquatic resources [C] // UNESCO IHP Technical Documents in Hydrology NO. 7. IHP - V Projects 2.3/2.4, UNESCO, Paris, [s. n.] 1997.
- [3] Harper D, Zalewski M, Jorgensen S. E, et al. Ecohydrology: Processes, Models and Case Studies [M] [s. l.]: Cabi Publishing, 2008.
- [4] Rodriguez - Iturbe I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate - soil - vegetation dynamics [J]. Water Resources Research, 2000, 36(1): 3 - 9.
- [5] Eagleson P. S. Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [6] William K. Is ecohydrology one idea or more? [J]. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(5): 805 - 807.
- [7] Rodriguez - Iturbe I, Porporato A. Ecohydrology of Water controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics [M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [8] 万力, 曹文炳, 胡伏生, 等. 生态水文学与生态水文地质学 [J]. 地质通报, 2009, 28(4): 567 - 574.
- [9] 严登华, 何岩, 邓伟, 等. 生态水文学研究进展 [J]. 地理科学, 2001, 21(5): 467 - 473.
- [10] Robert J N, Stuart E B, Lisa H, et al. The Science of Flow - Ecology Relationships: Clarifying Key Terms and Concepts [R]. [s. l.]: IHP, 2007.
- [11] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 833 - 836.
- [12] 黄奕龙, 付博杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展 [J]. 生态学报, 2003, 23(3): 16 - 20.
- [13] 杨大文, 李翀, 倪广恒, 等. 分布式水文模型在黄河流域的应用 [J]. 地理学报, 2004, 59(1): 143 - 154.
- [14] 杨国宪. 西北内陆河典型地区生态演变的思考 [J]. 人民黄河, 2005, (12): 35 - 38.