

生态水文过程研究进展

黄奕龙, 傅伯杰*, 陈利顶

(中国科学院生态环境研究中心 系统生态重点实验室, 北京 100085)

摘要:生态水文学是研究生态格局和生态过程变化水文学机制的科学。它的一个重要研究方向是在不同时空尺度上和一系列环境条件下探讨生态水文过程。生态水文过程是指水文过程与生物动力过程之间的功能关系, 它包括生态水文物理过程、生态水文化学过程及其生态效应。在探讨以上基本概念和总结生态水文过程研究特点的基础上, 着重探讨生态水文物理过程、生态水文化学过程及其生态效应等生态水文过程核心内容的研究进展, 并简要分析了生态水文过程研究中存在的主要问题和未来的研究热点。

关键词:生态水文学; 生态格局; 生态过程; 生态水文过程

Advances in ecohydrological process research

HUANG Yi-Long, FU Bo-Jie, CHEN Li-Ding (Key Lab. of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 580~587.

Abstract: Ecohydrology is a new interdisciplinary subject between ecology and hydrology that appears in the 1990s. It studies the hydrological mechanisms of ecological patterns and processes. A core content of ecohydrology is the study of ecohydrological processes under multiple temporal and spatial scales and under various environmental conditions. Ecohydrological processes integrate hydrological process with biota dynamics.

The are two important differences between Ecohydrological processes and traditional hydrological processes. The first is that ecohydrological emphasize the interaction between ecological processes and hydrological processes, the other is that ecohydrological processes involves the effect of different temporal and spatial scales. The study of ecohydrological processes includes ecohydrological physical processes, chemical processes and their ecological effects. Vegetation cover and land use are the two main factors which affect ecohydrological physical processes. It is thought that vegetation cover and land use can certain extent affect the water balance by changeing water distribution among evaporation, runoff, soil moisture and ground water. The study of ecohydrological chemical processes focus on landscape pattern and nutrition load, between hydrological pattern and nutrition load and on ecological flow. Hydrological processes are important to plant growth. They control many fundamental ecohydrological pattern and processes, especially vegetation pattern. Another important part of ecohydrology is the development of ecohydrological models. At present, with the widely applied use of GIS and RS, a lot of progress has been made on ecohydrological models. Finally, this paper puts forwards that big scales ecohydrological processes, ecohydrological model, ecohydrological restortation and mountain ecohydrological processes will be the hot spots in the future.

Key words: ecohydrology; ecological pattern; ecological processes; ecohydrological processes

基金项目:国家“十五”科技攻关资助项目(2001BA606A-03)

收稿日期:2002-02-03; **修订日期:**2002-11-10

作者简介:黄奕龙(1975~), 男, 广东翁源人, 博士生, 主要从事景观生态学和生态水文方面的研究。

* **通讯联系人** Author for correspondence, E-mail: bfu@mail. cees. ac. cn

Foundation item: The national advanced project of the tenth five-year plan (No. 2001BA606A-03)

Received date: 2002-02-03 **Accepted date:** 2002-11-10

Biography: HUANG Yi-Long, Doctor candidate. Main research field: landscape ecology and ecohydrology.

文章编号:1000-0933(2003)03-0580-08 中图分类号:P33 文献标识码:A

生态水文学是 20 世纪 90 年代兴起的,研究生态格局和生态过程变化的水文学机制的一门边缘学科,介于生态学与水文学之间,它的一个重要研究方向是在不同时空尺度上和一系列环境条件下探讨生态水文过程^[1,2]。生态水文学是在淡水资源短缺逐渐成为全球问题时,1992 年在 Dublin 国际水与环境大会上作为一门独立的学科提出来的^[3]。生态水文学的最终目标是在保持生物多样性、保证水资源的数量和质量的前提下,提供一个环境健康、经济可行和社会可接受的水资源持续管理范式^[3]。生态水文学和传统水文学最大的区别在于它吸收了许多生态学中的理论,特别是生态系统方法论。因此更为重视不同生态系统及其变化与水文过程间相互关系的探讨,而这正是生态水文过程研究的内涵。对生态水文过程进行研究可以为合理生态水文格局的构建和水资源的持续利用提供理论支持^[4]。随着水文循环的生物圈部分(BAHC)和国际教科文组织主持的国际水文计划(UNESCO/IHP2.3~2.4)等国际项目的实施,生态水文过程研究得到迅速的发展和广泛的重视,成为当前研究的热点。

1 生态水文过程的概念和研究特点

生态水文过程是指水文过程与生物动力过程之间的功能关系^[5]。它是揭示生态格局和生态过程变化水文机理的关键。生态水文过程涉及的内容复杂、研究上有很多难点,和传统水文过程研究相比,它有以下两个基本特点:

(1)重视生态过程和水文过程关系研究 水文学研究特别注重水文循环的物理过程,在研究一系列水文问题时将不同生态系统内的生物用地表特征参数进行处理。特别突出的例子是研究河流廊道中水文过程时,将河道中的植物当作粗糙系数来考虑^[6]。而生态水文过程研究则非常重视不同的生物(特别是植被)与水文过程之间相互影响、耦合关系的探讨,除重视物理过程之外还重视水文循环过程中生物的作用。水文过程-生态系统的稳定性、水文过程-生态系统协调机制之间的关系组成了基本的生态水文关系^[7],通过这种关系的研究可以为生态水文布局及其动态平衡的维持提供理论依据,为生态演替和水文循环变化及其相互关系提供合理的解释和有效的预测。

(2)尺度性 传统水文学中的尺度概念十分淡漠,在模拟水文过程时,一般不考虑尺度效应及不同尺度间的联系和转换^[7~9]。因此,生态水文学中的尺度更多是缘于生态学中的尺度思想及现代水文学中对尺度研究开始重视的基础上。生态水文过程的尺度体现在时空两个方面,空间尺度可以分为小尺度(如个体、群落)、中尺度(如集水区、小流域)和大尺度(如区域和全球);时间尺度跨越了以秒为单位到月、年以及百万年,甚至更长^[7~9]。空间尺度上说,一般的生态水文过程研究都是在小区上进行的。时间尺度上,短时间的人类活动可能并没有立即的生态水文响应,但若干时间后就会表现出来。可以说尺度在生态水文过程研究中随处可见。

2 生态水文过程的研究进展

陆面生态水文变化的一个主要原因是人类对植被覆盖和土地利用变化的驱动。从水分行为的角度来说,生态水文过程可以分为生态水文物理过程、化学过程及其生态效应几部分来进行研究。生态水文物理过程主要是指植被覆盖和土地利用对降雨、径流、蒸发等水分要素的影响;生态水文化学过程是指水质性研究;而水分生态效应主要指水分行为对植被生长和分布的影响。

2.1 生态水文物理过程

2.1.1 植被覆盖的影响 不同的景观都有一些相似的水文过程,而从独特的水文过程可以分析出景观的某些独特性质^[10],其原因主要是景观中的植被可以在多个层次上影响降雨、径流和蒸发,进而对水资源进行重新分配,并由此影响水文循环全过程,而人类活动和气候变化放大了植被的生态水文效应。

植被覆盖能够有效地影响地表反射率、地表温度、下垫面的粗糙度和土壤-植被-大气连续体间的水分交换。森林的蒸散量/降水量比值要高于灌丛和草地,它是森林影响土壤水、地表水和地下水水位的重要因素^[11]。在干旱半干旱生态系统,植被的蒸腾耗水也是一样明显,如湖泊周围植被的蒸散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^[6]。林区气温降低,地表粗糙度较高,增加了拦截、液化水平

汽流(如云、雾和霜等)的能力。已有的小区研究,如:Hursh 在美国田纳西州,我国 1951~1999 年林区和非林区的降雨量和植被覆盖间关系的研究均表明,林区能在一定程度上增加降雨,并且增加的主要是水平降雨^[12~15]。但在大尺度上,大面积自然植被的破坏,特别是热带雨林的破坏可能造成降雨量的减少,并改变整个区域的水文循环模式^[16~18]。科学家在亚马逊河流域做了大量的工作,预测表明流域的森林全部被砍光后,当地的降雨量将大幅度减小,并改变降雨过程的分配模式^[19,20]。当今,全球变暖、气候变干是一个不争的事实,人们更加重视植被对降雨量的影响,并将其研究和全球植被覆盖率降低、土地利用强度加大联系起来。

植被通过对降雨过程的再分配是它影响水文循环的重要方面。森林林冠截留的大部分雨量由蒸发返回大气,通过林冠后到达地表的雨量减少,时间上也要滞后。国外的研究表明,林冠的截留率占年降雨量的 20%~40%,我国得出的结果在 11.4%~34.3% 之间^[21]。通过林冠后,雨滴动能减少,同时林地枯落物对地表径流有较大的影响。林内枯落物通过对降水的吸纳,使地表径流减小,并增加对土壤水的补给;枯落物吸水可达自重的 40%~260%。来自四川冷杉林的研究表明,降雨量小于 5mm 时,枯落物几乎可以吸收这部分雨量^[21]。枯落物及林地良好的结构增加水分的渗透和蓄积,同时使地表径流减弱和径流时间滞后。林地土壤入渗率可以达到草地的 2~4 倍,其土壤的保水能力也比灌木、草地和裸地高。周晓峰的研究表明,将藓类-杉木林转变为灌木林后,0~80cm 土壤蓄水能力降低了 42.13%,0~20cm 降低了 66.1%^[11]。

然而,由于森林生态系统本身的复杂性,以及影响地表径流因素的复杂性,森林对径流的影响一直有不同的看法。在集水区尺度上,国内外的研究均表明:植被覆盖增加,径流和养分流失减少;并且在原无植被覆盖的地区种植植被将会减少地表径流量^[11,22~24]。Stednick、Jones 和 Grant 在美国较大流域上的研究也验证了以上结论^[25,26]。N. Fohrer^[27]在 Dietzh lze 流域的研究还表明,和壤中流、溪流相比,地表径流对植物覆盖参数最为敏感;A. Kleidon^[28]在 Amazon, S. Hageman^[29]在南非 Sambesi 集水区的研究表明,随着地下生物量的增加,径流量、产沙量和养分流失减少。Jayasuriya^[30]在澳大利亚对桉树砍伐方式的研究表明,斑块状的皆伐方式比间伐对径流量的贡献更大。Hornbeck^[31]在美国西南部研究表明,植被皆伐后,不同地理单元降雨量的高低通过影响植被恢复速度也影响水量的变化,长时间来说,干旱区的影响将更为持久;而皆伐后,自然恢复比人工恢复能更快地降低产流量。另一种观点认为,植被减少,径流减少。来自埃塞俄比亚北部、坦桑尼亚 Kondoia 和我国长江上游的研究都得出这个结论^[11,32,33]。而 Wright^[25]的研究表明了植被覆盖和径流没有明显的比例关系。I. Braud^[34]在 Andes 研究了植被对径流的影响,通过两个集水小区 1983~1994 年的研究表明地质条件相同时,径流对植被覆盖不敏感。前苏联西北部 and 上伏尔加流域等集水区以及我国在海南等地的集水区研究也表明,小流域年径流量和植被覆盖率没有明显的比例关系^[11]。因此,不同的自然条件和尺度下,植被对径流的影响不尽相同,降雨量、土壤前期湿润状况、地理条件和森林覆盖率、植被群落结构都有可能占优势,并由此而导致径流的时空格局与过程上的差异,某一自然条件和不同尺度上得出的结论不能简单地外推^[35]。

总之,森林能在一定的条件下通过改变水分在蒸发、径流、土壤水和地下水间的分配,从而影响极端水文事件(洪水和干旱)的发生,增加区域的保水能力和对水土流失的绝对控制能力^[37]。灌丛和草地对水文过程有相似的影响,但和森林相比要简单得多。植被通过影响水文过程而影响生态系统的营养负荷和沉积物运移被认为是生物地球化学循环的重要“发动机”^[4]。

2.1.2 土地利用的影响 土地利用变化的重要环境反应是以水文行为变化出现的,如径流的组成、侵蚀速率或地下水补给速率的变化,而水文行为变化又会环境影响并反作用于土地利用,由此交织形成一个复杂并相互作用的系统^[38]。土地利用强度的加大增加了水资源的利用率,增加了地表水的排泄速度,地下水的过度抽取导致水位下降,形成大面积的降落漏斗^[39],并且在部分城市已经出现了严重的地表沉降和海水入侵现象。另一方面,土地利用加大对水资源的利用,同时也增加了大气湿度和地表湿度,有助于降雨的形成^[40]。在干旱、半干旱地区,沙漠化对局地 and 区域影响将使温度增加、降水减少,并改变整个区域的生态水文循环^[41]。世界范围内,由于土地利用变化而引起的沉积物运移已经极大地增长了^[38,42]。由于土地利用类型的多样性和利用结构的复杂性,土地利用格局与水文过程的关系一直是一个重要的研究课题。

题。和农耕地相比,休闲地在地下水的补给中贡献很大,但同时它也增大了地表产流量和河道排泄^[42]。傅伯杰等在黄土高原的研究表明坡耕地-草地-林地格局(由坡面下部至上部顺序,下同)对减少水土流失最为有利。土壤水分的变异为:草地-坡耕地-林地呈 U 型,坡耕地-草地-林地呈 W 型,坡耕地-林地-草地呈 V 型。在坡耕地-草地-林地格局中,林草地的高入渗率和有效的植被覆盖减少了地表径流的产生和沉积物的运移,具有较好的保持养分和水分的作用,因此对水土保持最为有利^[43]。

2.2 生态水文化学过程

生态水文化学过程不同于生态过程中的化学过程,它主要是指水文行为的化学方面,也即水质性研究。人类耕作(特别是化肥和杀虫剂的使用)造成的点源、非点源污染和定居(城市污水)引起的生态水文变化已造成了世界性的水污染^[44,45],它的一个重要方面是体现在淡水生态系统与营养负荷上。水文过程可以通过多种水文要素,如水位、水力影响营养物质在淡水生态系统内的分布与富集^[46,47]。淡水生态系统周围的湿地、洪泛平原可以通过影响河流水流格局和地下水的补给、径流和排泄,在控制和降低营养物的沉积、运移、营养负荷,净化水质(特别是降低水质硬度)方面具有重要的作用^[48]。由于淡水生态系统周围湿地斑块分布上的差异性,营养物呈现不同的分布和富集程度^[49,50]。而近代对湿地的过度开发、洪泛平原的面积减少和质量的下降、河流的疏导严重地影响了水流的排泄,养分的运移、沉积和污染的分布格局。河流生态学的发展,特别是河流连续体概念(River Continuum Concept,简称 RCC)^[51]、序列不连续体概念(Serial Discontinuity Concept,简称 SDC)^[52]和“斑块网络概念(Patch Network Concept,简称 PNC)”^[53]的提出和发展极大地促进了河流生态系统生态水文过程研究。

目前的研究主要集中在以下几个部分:(1)景观格局与营养负荷,A. Hillbricht-Ilkowska^[54]研究了不同景观中湖泊水域生态水文过程,通过湖泊周围 8 个集水小区的实验观测表明:湖泊破碎化、斑块镶嵌程度越高,湖泊周围的河网、湿地斑块在营养物的运移、输送过程中起的作用越大。TP 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的富集没有明显的季节性和年度变化,春季淡水补给加强了水文交替是 TP 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 加速向湖泊运移的主要驱动力。另外,E. Holzbecher^[55]研究了德国 Stechlin 湖斑块的分布与结构对湖泊富营养化的影响。W. L. F. Brinkman 等^[48]研究了波兰 Plock 附近的 VISTULA 河洪泛平原的结构和功能及与营养负荷的关系。(2)水文格局的化学效应,I. Wagner 等^[56]对低地水库水文格局对生物过程的影响的研究结果表明:Sulejow 水库支流水文特征和营养输送格局呈现极大的正相关,河水对水库的补给造成的 TP 富集和洪水动态相关系数达 0.52,但和水库的排泄相关性不大;洪水的水文特征(平均流量、平均流速)和藻类生物量相关系数为 0.769;水库周围 150hm^2 的湿地对 TP 的去除率达到 $17\%\sim 27\%$ 。(3)生态流量,J. L. Kemp^[57]对生境尺度的河流生态水力进行了研究,结果表明大型植被对水力影响较大,边缘生境的 Froud 指数较小,也即对水力比较敏感,容易破碎化。并用 Froud 指数建立了“功能生境”(生态学尺度)和“小生境流”(水力学尺度)间的联系,为“河流生态可接受量(AEF)”的测定和建立流域关键过程与淡水生态系统联系成为可能,被称为是河流管理和恢复的有力工具。除此之外,还有其它方面的研究。Carpenter 回顾了人类活动及气候变化对淡水生态系统的影响,指出:“当今,对淡水生态系统最严重的压力来自于流域生态结构的改变和利用以及人类造成的水资源的污染”^[58,59]。

2.3 水文过程的生态效应

水文过程控制了许多基本生态学格局和生态过程^[60],特别是控制了基本的植被分布格局^[61],是生态系统演替的主要驱动力之一。利用调整水文过程的方法可以很好地控制植被动态,例如:水文过程可以调整 and 配置景观内的“流”(包括营养物,污染物,矿物质,有机质);水质的恶化和水位(特别是地下水浅水位)变化,水化学特征及其变化,影响植物的群落结构、动态、分布和演替^[62]。可以利用水的流量、流速、质量等水文要素对生境进行重塑并控制植被群落^[63,64]。近代对土地利用强度的加大,增加了植被对水分的获取程度,适干群落易于入侵,并成为优势种^[27,63,64]。I. Rodriguez-Iturbe 等人^[65~68]在南非 Nylsvley 稀疏草原的研究表明,虽然对水的利用不同,但在水胁迫下,不同的群落都有一些相同的响应方式;在 Texas 的研究表明植物根系的发育数据降雨影响着土壤水动态和植物水分胁迫程度,树木和草本对水胁迫的响应程度不同,在水胁迫下,根系浅的植物对水的利用效率要更高;在 Colorado 稀疏草原的研究表明,不同的土壤结构

条件下,在湿润季节适合于某一植物生长的立地在干旱季节将变得不再适合于生长,这为解释“优势种”出现的原因提供了帮助。P. H. Glaser 等^[69]研究了植被对水化学和水文梯度的响应,通过 Minnesota 北部同一个水文景观内碱沼和高位沼泽两个不同湿地类型的对比表明植被对水化学梯度很敏感,水化学梯度(主要是 PH 值和 Ca 含量)对植被群落演替具有重要的作用,碱沼具有较低的植物多样性,并且生长的都是根系极深的植物。而合理的水供给可以增加植物对营养物的获取,增加植物的固碳能力,并由此促进植物的生长和净初级生产力,这在干旱区、半干旱区及湿地都被证明是正确的^[45]。

除了以上基础研究之外,生态水文过程研究的一个重要方向是生态水文模拟。由于水文条件本身的复杂性以及影响水文行为的要素时空分布的不均匀性和变异性(如离散性、周期性和随机性),增加了研究的复杂性,生态水文变化难于直接量化。可以用于生态水文过程研究的模型都可以认为是生态水文模型,它为计算和模拟生态水文变化提供了极大的帮助。目前主要有以下一些生态水文模型:(1)集总模型,如用于流域生态水文模拟的 RHES 模型、XAJ 模型、TANK 模型、SLT 等多个模型^[6,70];而就一局部土地单元来进行生态水文过程模拟就是常说的土壤-植被-大气连续体研究,主要有 WAVES 模型^[71]、SWIMV2.1 模型、PATTERN 模型、植被界面过程模型等多种 SVAT 模型^[6,72];用于森林生态水文过程模拟的 RUTTER 模型、MASSMAN 模型^[6];(2)要素模型,模拟土壤水分的 PHILIP 模型、HOTTAN 模型等^[6],模拟土地利用变化对水文过程影响的 LUCID 模型^[44]等。地理信息系统(GIS)和遥感(RS)的发展极大地推动了生态水文模型的发展。应用 GIS、RS 和数学模型耦合为量化生态水文变化提供了帮助。在此基础上构建的决策模型系统可以衡量水文景观管理和国家耕作政策对生态水文过程的影响,已经逐步成为决策的有力工具^[42]。

3 生态水文过程研究展望

生态水文过程研究是从复杂的生态水文结构到生态水文功能的机理性探讨,关键任务是研究水文过程和生物动态之间的功能关系,目的是增加对陆面生态水文过程和功能的充分理解并更好地评价和利用它们,预测生态水文过程变化可能带来的后果,为良性生态水文的维持和生态水文恢复提供理论依据。本文认为在加强生态水文学基础理论研究,充分应用已经相对成熟的生态学和水文学理论的基础上,生态水文过程研究存在以下几个问题,也是未来的研究热点。

3.1 大尺度生态水文过程研究 集水区是一个完整的水文景观单元,它是连接生态学和水文学的研究的桥梁,是进行生态水文研究的天然场所,以前的研究大多在集水区尺度上进行。然而气候模型和大尺度上的生态水文过程研究非常密切,大尺度生态水文研究有利于建立陆面生态水文过程耦合模型,而陆面生态水文过程模型和宏观尺度的天气动力学模型的结合使预测气候变化对水文水资源、生态系统的影响和预测地球的可居住性成为可能^[73]。多尺度生态水文过程研究带来的一个问题是尺度转换,由于不同尺度上的研究目的并不一样,因此尺度问题的难点有时并不在于尺度转换的技术,而在于其研究本质意义的探索。

3.2 生态水文模型 虽然近些年来生态水文模型发展很快,但在集总模型,如土壤-植被-大气连续体模型主要是发展了地块尺度上的一维 SVAT 模型,对二维、三维模型还没有开始,并且一维的研究问题还没有完全解决。已开发的众多生态水文模型也大多具有尺度性,只能在某一尺度上使用,而应用到其它尺度存在再参数化和精度问题。生态水文模型和 GIS、RS 的耦合上也只是一种数据共享的初级耦合,一体化式耦合模型的建立尚需时日。

3.3 生态水文恢复 生态水文过程研究要解决的一个重要问题是生态水文恢复。研究水分行为对植被覆盖的敏感性,水分行为的生态效应,目的是为用植被进行生态水文恢复提供理论依据^[3]。目前,水质性研究得到极大的重视,特别是水体富营养化的修复治理方面在国内外已有不少成功的实例。对我国来说,生态水文恢复的一个重点区是西部。本文认为我国西部生态重建、退耕还林还草的成功与否,关键在于生态水文过程的控制与调节。国内对该问题认识不多或仍处于朦胧状态,例如,前一段时间,关于西部还林还是还草的争论,其焦点就是构建良好的植被群落结构调节和控制生态水文过程,形成合理的生态水文格局,以达到生态恢复的目的。对于黄土高原,已有的研究表明水土保持加强了流域内的水分小循环过程,削弱了水文大循环^{参考文献}。有的观点认为,林草建设既要考虑土壤水分生态环境影响,又应符合植被分布的地带性规律^[37];而对于不同的地理单元,应根据它的目的是水源涵养、防风固沙

还是水土保持,而建立不同的群落和达到不同的覆盖度。随着西部生态恢复、重建工作的进一步深入,如何维持不同土地利用类型总耗水量与可利用水总量的平衡?水土保持对不同尺度上水分行为的影响等方面的研究将会得到更多的重视,以尽快实现西部的生态水文恢复。

3.4 山地生态水文过程研究 山地生态系统是全球变化最敏感的区域,同时山地面积占全球的 1/6,提供全球 1/2 的淡水资源。《21 世纪议程》认为山地生态系统对全球生态系统的生存非常重要,对其生态水文过程的研究将有助于水土保持,生境恢复和生物多样性的保持^[75]。山地生态系统具有独特性和对环境变化敏感性的特点,山地生态系统生态过程和水文过程间的相互作用关系及其时空变化,山地垂直梯度生态水文过程的监测与测试,对研究不同土地利用/覆盖变化和气候变化对山地生态系统生态水文过程的影响非常重要。同时,山地的许多相关特征可以作为环境变化和生态退化的指示,长时间的生态水文过程和全球变化冰雪指示调查,构建不同山地生态系统和河流盆地间的相互关系的区域模型,对监测全球变化有重要的意义^[4,76]。

References:

- [1] Zalewski M. Ecohydrology-the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1):1~8.
- [2] Janauer G A. Ecohydrology:fusing concepts and scales. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1):9~16.
- [3] Zalewski M, Janauer G A, *et al.* Ecohydrology: A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources. Paris. UNESCO, 1997. 1~56.
- [4] Hutjes R W A, Kabat P, Running S W, *et al.* Biospheric aspects of the hydrological cycle. *Journal of Hydrology.*, 1998, **213~214**(1~4):1~21.
- [5] IHP(UNESCO-IHP). Workshop on Ecohydrology. Lodz. Poland, 1998.
- [6] Wang G X, Qian J, CHENG G D. Current situation and Prospect of the Ecological Hydrology, *Advance in Earth Sciences*, 2001, **16**(3):314~323.
- [7] Xia J. Development and thinking of hydrological science. In: Liu Ch M, ed. *New questions, new technology and method of Chinese hydrology research in 21th.* Beijing: Science press, 2000. 18~27.
- [8] Cheng X, Cheng Y Q. The scaling question in hydrological processes research. In: Liu Ch M, eds. *New questions, new technology and method of Chinese hydrology research in 21th.* Beijing: Science press, 2000. 28~40.
- [9] Dooge J C I. Hydrology in perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 1995, **33**(2):61~85.
- [10] Winter T C. The concept of hydrological landscapes. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, **37**(2):335~349.
- [11] Zhou X F. Proper Assessment for Forest Hydrological Effect. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5):420~426.
- [12] Min Q W, Yuan J Z. Effects of Forest on Regional Precipitation: Results from some Different Analyses and Their Comparison. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5):467~473.
- [13] Ge Q Sh, Zhao M C, Zhang X Q, *et al.* Statistical Analysis about the Changes of forest Resources and Precipitation in China over the Past 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5):413~419.
- [14] Luo W S. The Impact of Forest on Precipitation and vaporation. *Hydrology*, 1989, **6**:32~36.
- [15] Quan L Q, Zhang Y G, Wang Y C, *et al.* The effect of rain in forest. In: The agriculture association and The mechanism association eds. *Corpus of forestry meteorologic*. Beijing: Meteorological press, 1984. 14~23.
- [16] Bromley J, Brouwer J, Barker A P, *et al.* The role surface water redistribution in an area of patterned vegetation in a semi-arid environment, south-west Nirger. *Journal of Hydrology*, 1997, **198**:1~29.
- [17] Dickenson R E. Global change and terrestrial hydrology—areview. *Tellus*, 1991, **43**:176~181.
- [18] Richey J E, Nobre C, Deser C. Amazon River discharge and climate variability: 1903~1985. *Science*, 1989, **246**:101~103.
- [19] Lean J. Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. *Nature*, 1989, **342**:411~413.
- [20] Skukla J. Amazonian deforestation and climate change. *Science*, 1990, **247**:1322~1324.
- [21] Wang L X, Xue M S, eds. *The hydroecological benefit and information system of upland defend forest on soil and water conservation*. Beijing: Forest press, 1997. 1~20.
- [22] Bosch J R, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determines the effect of vegetation change of water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982, **55**:3~22.
- [23] Hewlett J D, Bosch J M. The dependence of storm on rainfall intensity and vegetal cover in South Africa. *Journal of hydrology*, 1984, **75**:365~381.
- [24] Hibbert A B. Water yield improvement potential by vegetatio maagement on western rangelands. *Water Resources Bulletin*, 1983, **19**:375~381.
- [25] Ziemer R R, Lisle T E. River ecology and magement: coast ecoregion lessons from the pacific. *Springer*, 1998, 56~68.
- [26] Stednick J D. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 1996, **176**:79

~95.

- [27] Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, *et al.* Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Phys. Chem. Earth (B)*, 2001, **26**(7~8): 577~582.
- [28] Kleidon, Heimann M. Assessing the role of deep rooted vegetation in the climate system with model simulations: mechanism, comparison to observations and implications for Amazonian deforestation. *Climate Dynamics*, 2000, **16**: 183~199.
- [29] Hagemann S, Kleidon A. The influence of rooting depth on the simulated hydrological cycle of a GCM. *Phys. Chem. Earth (B)*, 1999, **26**(7): 775~779.
- [30] Jayasuriya M D A, Dunn G, Benyon R, *et al.* Some factors affecting water yield from mountain ash dominated forests in south-east Australia. *Journal of Hydrology*, 1993, **150**: 345~367.
- [31] Hornbeck J W, Adams M B, Corbett E S. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. *Journal of Hydrology*, 1993, **150**: 323~344.
- [32] Cheng G W. Forest change: Hydrological effects in the upper Yangtze river valley. *AMBIO*, 1999, **28**(5): 456~459.
- [33] Ruprecht J K, Stoneman G L. Water yield issues in the jarrah forest of south-western Australia. *Journal of Hydrology*, 1993, **150**: 369~391.
- [34] Braud A I J, Vich J Zuluaga, *et al.* Vegetation influence of runoff and sediment yield in the Aude region: observation and modeling. *Journal of hydrology*, 2001, **254**: 124~144.
- [35] Sandstrom K. Forest Can Provide Water: A Widespread Story or A Science affect. *AMBIO*, 1998, **27**(2): 132~138.
- [36] Abtem W. Evapo-transpiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. *Water Resources Bulletin*, 1996, **32**: 465~473.
- [37] Huang M B, Kan S Z, Li Y S. The water environment change in the Watersheds in the Guanyu plateau Region of Less Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(4): 411~414.
- [38] Schulze R E. Modelling Hydrological Responses to Land Use and Climate Change: A Southern African Perspective. *AMBIO*, 2000, **29**(1): 12~22.
- [39] Otsubo K, Zhang Z J, Ishii T. Influence of intensive land use on groundwater resources in the Heibei plain. In: R. B. Singh, T. Fox, Y. Himi eds. *Land use and land cover change*. N. Y., Science publisher, inc, 225~237.
- [40] Fu B J, Chen L D, Ma K M, *et al.* *The Theory and Applied of Landscape*. Beijing: Science Press, 2001. 129~132.
- [41] Schlesinger W H, Reynolds J F, Gunningham G L, *et al.* Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, **247**: 1043~1048.
- [42] Bormann H, Dieckkruger B and Hauschild M. Impacts of landscape management on the hydrological behaviour of small agricultural catchments. *Phys. Chem. Earth (B)*, 1999, **24**(4): 291~296.
- [43] FU B J, CHEN L D, MA K M. The Effect of Land Use Change on the Regional Environment in the Yuanguan Gou Catchment in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1999a, **54**(3): 1241~1246.
- [44] Terpstra J, Van A Mazijsk. Computer aided evaluation of planning scenarios to assess the impact of land-use changes of water balance. *Phys. Chem. Earth (B)*, 2001, **26**(7~8): 523~527.
- [45] Shi P J, Gen P, Li X B, *et al.* *The method and Applied of Land Use and Land Cover*. Beijing: Science Press, 2000. 19~35.
- [46] Dakova SN Y, Uzonov D, Mandadjiev. Low flow-the river ecosystem's limiting factor. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1): 167~174.
- [47] Dubnyak S, Timchenko V. Ecological role of hydrodynamic processes in the Dnieper reservoirs. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1): 181~188.
- [48] Brinkmann W L F, Magnuszewski A, Zober S. The structure and function of the Vistula River floodplain near Plock, Poland. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1): 159~166.
- [49] Codd G A. Cyanobacterial toxins, the perception of water quality, and the prioritisation of eutrophication control. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**G. A(1): 51~60.
- [50] Tomaszek J A, Czerwieniec E. *in situ* chamber denitrification measurements in reservoir sediments: an example from southeast Poland. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1): 61~72.
- [51] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al.* The river continuum concept. *Can. J. Fish Aquat Sci.*, 1980, **37**: 130~137.
- [52] Junk W J, Bayley P B, Sparks R E. The flood pulse concept in river floodplain system. *Can. Spec. Publ. Fish Aquat Sci.*, 1989, **106**: 110~127.
- [53] Schuller D, Brunken-Winkler H, Busch P, *et al.* Sustainable land use in an agriculturally misused landscape in northwest Germany through ecotechnical restoration by a "Patch-Network-Concept". *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1): 99~118.
- [54] Hillbricht-Ilkowska, Rybak J, Rzepecki M. Ecohydrological research of lake-watershed relations in diversified landscape. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1): 91~98.
- [55] Holzecher E, Nutzmann G. Influence of the subsurface watershed of eutrophication-Lake Stechlin case study. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1): 31~38.
- [56] Wagner M, Zalewski. Effect of hydrological patterns of tributaries of biotic processes in a lowland reservoir-consequences for restoration. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1): 79~90.
- [57] Kemp J L, Harper D M, Crosta G A. The habitat-scale ecohydraulics of rivers. *Ecol. Eng.*, 2000, **16**(1): 17~29.

- [58] Carpenter S R, Fisher S G, Grimm N B. Global change and freshwater ecosystems. *Eco. Syst.*, 1992, **23**: 119~140.
- [59] Li X B. The Impact of Land Use and Land cover on Environment. *Advances in Earth Science*, 1999, **14**(4): 395~406.
- [60] Rodriguez-Iturbe, Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water resources research*, 2000, **36**(1): 3~9.
- [61] Jackson R B, *et al.*, Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models. *Ecology Applied*, 2000, **10**: 470~483.
- [62] Garcia N F, Merino J. Pattern and process in the dune system of the Donana National Park, Southwestern Spain. In: van der Maarel, Ed. *Dry Coastal Ecosystems, General aspects*, Elsevier, Amsterdam, 349~362.
- [63] Wu Q, Deng D L. The Major Problems of Eco-hydrology and its Study way. *Hydrogeology and Engineering*, 2001, **28**(1): 69~72.
- [64] Klijn F, Witte J-P M. Eco-hydrology: Groundwater flow and site factors in plant ecology. *Hydrogeology Journal*, 1999, **7**: 65~77.
- [65] Rodriguez-Iturbe, 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**: 695~705.
- [66] Laio F, Porporato A, Ridolfi L, *et al.* Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress II. Probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in water resources*, 2001, **24**: 707~723.
- [67] Porporato, Laio F, Ridolfi L, *et al.* Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress III. Probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in water resources*, 2001, **24**: 725~744.
- [68] Laio F, Porporato A, Fernandez-Illescas C P, *et al.* Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress IV. Discussion of real cases. *Advances in water resources*, 2001, **24**: 745~762.
- [69] Glaser P H, Janssens J A, Siegel D I. The response of vegetation to chemical and hydrological gradients in the lost river peatland, northern Minnesota. *Journal of Ecology*, 1990, **78**(2): 1021~1048.
- [70] Zhang G X. Some Questions of Whedsheds Hydrology Model. *Advances of Water Sciences*, 1994, **5**(3): 248~253.
- [71] Mingbin Huang, Mingan Shao, Yushan Li. Comparison of a modified statistical-dynamic water balance model with the numerical model WAVES and field measurements. *Agricultural water management*, 2001, **48**: 21~35.
- [72] IGU99 Birmingham (International Union of Geodesy and Geophysics, July 19 to July 24, 1999) abstracts A and B. 1999, 273~290.
- [73] Mu H Q, Xia J. Advances in the parametric method of earth surface. *Yangtze*, 2000, **31**(7): 10~14.
- [74] Ding L X. Progress about the effects of Soil and Water Conservation on Water Environment of the Watersheds in the Loess Area. *Water Resources and Water Engineering*, 2000, **11**(1): 17~21.
- [75] Chases T N, Pielke sr R A, Kittel T G F, *et al.*, Potential impacts on Colorado Rocky Mountain weather due to land use changes of the adjacent Great Plains. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**: 16673~16690.
- [76] Michael E M. IGBP. mountain research initiative. *BACH NEWS*, 2000, **7**: 1~15.

参考文献:

- [6] 王根绪, 钱驹, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望. *地球科学进展*, 2001, **16**(3): 314~323.
- [7] 夏军. 水文学科发展与思考. 见: 刘昌明主编. 21 世纪中国水文科学研究的新问题、新技术和新方法. 北京: 科学出版社, 2000. 18~27.
- [8] 陈喜, 陈永勤. 水文过程中的尺度问题. 见: 刘昌明主编. 21 世纪中国水文科学研究的新问题、新技术和新方法. 北京: 科学出版社, 2000. 28~40.
- [11] 周晓峰. 正确评价森林水文效应. *自然资源学报*, 2001, **16**(5): 420~426.
- [12] 闵庆元, 袁嘉祖. 森林对降水的可能影响: 几种方法所得结果的比较. *自然资源学报*, 2001, **16**(5): 467~473.
- [13] 葛全胜, 赵名茶, 张雪芹. 过去 50 年中国森林资源和降水变化的统计分析. *自然资源学报*, 2001, **16**(5): 413~419.
- [14] 穆文生. 森林对降雨和蒸散发的影响. *水文*, 1989, 6: 32~36.
- [15] 钱林清, 张友贵, 王余初, 等. 森林降水效应研究初报. 中国农学会农业气象研究会, 中国机械学会编, 林业气象文集. 北京: 气象出版社, 1984. 14~23.
- [21] 王礼先, 解明曙主编. 山地防护林水土保持水文生态效益及其信息系统. 北京: 中国林业出版社, 1997. 1~20.
- [37] 黄明斌, 康绍忠, 李玉山. 黄土高原沟壑区小流域水分环境演变研究. *应用生态学报*, 1999, **10**(4): 411~414.
- [40] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学的原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001. 129~132.
- [43] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地变化对生态环境的影响: 以延安市羊圈沟流域为例. *地理学报*, 1999a, **54**(3): 1241~1246.
- [45] 史培军, 宫鹏, 李晓兵. 土地利用/覆盖变化研究的方法与应用. 北京: 科学出版社, 2000. 19~35.
- [59] 李晓兵. 土地利用/覆被变化的环境影响. *地球科学进展*, 1999, **14**(4): 395~406.
- [63] 武强, 董东林. 生态水文研究的主要问题与方法. *水文地质工程地质*, 2001, **28**(1): 6.
- [70] 张国祥. 流域学用水文模型介绍. *水科学进展*, 1994, **5**(3): 248~253.
- [73] 穆宏强. 夏季土壤过程参数化研究进展. *人民长江*, 2000, **31**(7): 10~14.
- [74] 丁琳霞. 黄土高原水土保持的水环境效益研究进展. *西北水资源与水工程*, 2000, **11**(1): 17~21.