

“生态水文学”学科发展和研究方法概述

吕文^{1,2}, 杨桂山¹, 万荣荣¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:生态水文学作为解决现代水问题的新方式,源于解决环境问题的新思考方式——“生态工程”,以“生态水文”为主题的论文、专著、会议成蓬勃发展之势。目前研究方法概述有:①国内外多种相关监测计划的建立以及各种估算方法相结合;②流域对比、传统的宏观和基于集对原理的微观相关分析揭示机理;③多种生态水文模型与遥感技术相结合模拟生态水文过程。未来发展方向主要归纳如下:①亟待生态水文学解释与水分驱动生态系统演化相关的重大问题;②寻找生态恢复的合适尺度,通过模型尽可能描述水量平衡及水文过程;③亟待开展极端事件对气候变化和人类活动的响应研究;④加强古生态学研究,在长时间序列中识别长期生态水文演变。

关键词:生态水文学;学科诞生和发展;研究方法概述;学科展望

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2012)05-0029-05

Overview of discipline development and research method for ecohydrology

LÜ Wen^{1,2}, YANG Guishan¹, WAN Rongrong¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology,

CAS, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Ecohydrology is a new way to resolve the modern water problems, originated from a innovative way to solve the environment problem. Ecological Engineering (EE). The papers, books and meetings with the theme of “ecohydrology” have been booming. At present the research methods can be summarized as: ① Many monitoring projects in China and other countries and combined with empirical estimations; ② Watersheds compared, macroscopic and microcosmic correlation analysis based on Set Pair Analysis (SPA); ③ combining ecohydrology models and remote sensing images. Future studies could be summarized as: ① searching some factors which effect ecosystems evolution with ecohydrology; ② choosing appropriate scale, expressing water balance and water cycling with models; ③ researching the effect of climate change and human activities on extreme events; ④ strengthening paleoecology studies and discriminating ecohydrology evolution in a long-term series.

Key words: ecohydrology; origin and development of discipline; outline of research methods; outlook of discipline

生态水文学作为 UNESCO/IHP 第七阶段的主题之一,是联合国科教文组织(UNESCO)、国际水文计划(IHP)和人地圈计划(MBP)十多年科学研究的结果,以综合、跨学科的科学方式应对人类和生态系统的需水平衡,充分重视这场人类和生态系统的“平衡行动”^[1-2],从可持续科学角度提出解决方案:综合各种学科知识,特别考虑经济方面;理解过去,如文化遗产、古水文、生态演替形式;应用系统科学和“预见”方法识别未来情景^[3]。

1 生态水文学的诞生与发展

1.1 生态水文学诞生

当前水污染和洪水控制等水问题都是以水文技术方法来解决,虽然以水文技术方法来解决这些问题是迫切的,但是仅仅以水文技术方式却不够,反而会导致过度工程化,减少生物多样性,最重要的是干扰生态系统的动态平衡,降低水圈-生物圈中富有动力机制的自我调节能力^[4]。此外,流域水循环是生物地球化学演化的结果,需要理解多种尺度环境

收稿日期:2012-02-18; 修回日期:2012-05-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41030745);国家自然科学基金面上项目(41071354)资助

作者简介:吕文(1986-),女,江西九江人,博士研究生,主要从事土地利用生态水文效应。

生物过程,将源自于基本生态手册^[4]的综合科学分析方法^[5]和交叉学科研究方法^[6]并用。

使用以类似于“生态水文学”的概念已经有几十年了,也许追溯到20世纪70年代日本学者Hino提出的“生态水力学”^[7]概念。1993年由Mitsch提出的“生态工程”^[8],是解决环境问题过程中的一个里程碑,改变了对人类和生物圈相互作用的思考方式,它将生态系统特性作为一种新的管理工具,并且推广到流域尺度中。由Zalewski等人将“生态工程”以一个新的概念——“生态水文”^[9]推广到整个流域生态——水文过程的调节。

1.2 “生态水文学”学科蓬勃发展

20世纪80年代晚期和20世纪90年代早期以“生态-水文”为主旨的研究在芬兰的学者之间较为活跃,1991年荷兰景观生态协会(WLO)组织了以“服务于政策和管理的生态水文预测方法”为主题的会议^[10]。而由Zalewski编辑UNESCO IHP-V中2.3/2.4中的出版物^[9],和《生态工程》特刊^[4]在“生态水文学”学科发展中具有里程碑意义,提出的生态水文学概念(Ecohydrology)引用最频繁^[6]。

据ISI Web of Knowledge Science Citation Index 数据库统计,以ecohydrology为主题的文献,从1990年以来,共561个,来源期刊多达100多种。其中,文献引用率高的来源期刊为Water Resource Research,Advances in Water Resources,Ecology,Agricultural and Forest Meteorology,Oecologia。据ISI Web of Knowledge Science Citation Index 数据库统计,2000年以来,以ecohydrology为主题发表的论文数呈增加的趋势(图1),以ecohydrology为研究主题的专著自1993年以来多达11本,并且呈上升趋势(表1),研究内容多为plant-soil-water连续体的相互作用。涉及ecohydrology研究活动的会议多达55个(表2)。

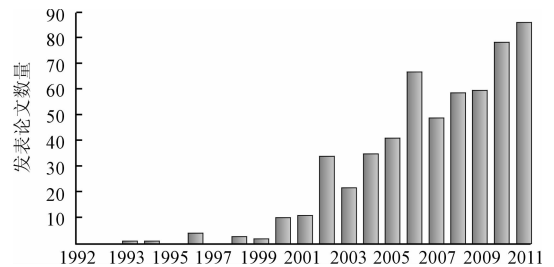


图1 以 ecohydrology 为主题发表的 SCI 论文数量

表1 1993年以来以 ecohydrology 为主题的专著列表

| 专著名称 | 第一编者 | 出版年 |
|--|------------------|------|
| Mires: Process, exploitation and conservation | Heathwaite AL | 1993 |
| Ecohydrology and Hydroecology | Baird AJ | 1999 |
| Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function Environment in Asia Pacific Harbours | Peter S Eagleson | 2002 |
| Dryland Ecohydrology | Wolanski E | 2006 |
| Ecohydrology: Vegetation Function, Water and Resource Management | Dodorico P | 2006 |
| Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security | Eamus D | 2006 |
| Hydroecology and Ecohydrology: Pase, Present and Future | Petrosillo I | 2007 |
| Year in Ecology and Conservation Biology | Paul J. Wood | 2007 |
| Ecohydrology: Processes, Models and Case Studies: An Approach to the Sustainable Management of Water Resources | Ostfeld RS | 2008 |
| Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions | Harper D | 2008 |
| | Levia DF | 2011 |

注:文献和书籍资料源于 ISI Web of Knowledge Science Citation Index 数据库。

表2 2008年以来涉及 ecohydrology 的会议列表

| 会议名称 | 会议地点 | 会议日期 |
|---|-----------------------|---------|
| European - Geophysical - Union General Assembly 2008 | Vienna, AUSTRIA | 2008.4 |
| National Meeting of the British - Hydrological - Society | Loughborough, ENGLAND | 2008.6 |
| Conference of the Landscape Ecology Working Group of the International Union of Forest Research Organizations | Chengdu, CHINA | 2008.9 |
| 8th International Conference on Environmental Management of Enclosed Coastal Seas 1st International Conference on BioGeoCivil Engineering | Shanghai, CHINA | 2008.10 |
| 10th International Congress of Ecology | Brisbane, AUSTRALIA | 2009.8 |
| 139th Meeting of the American - Fisheries - Society | Nashville, N, USA | 2009.8 |
| Biohydrology 2009 International Conference | Bratislava, SLOVAKIA | 2009.9 |
| 40th Binghamton Gromorphology Symposium | Blacksburg, VA | 2009.10 |

注:会议资料源于 ISI Web of Knowledge Science Citation Index 数据库。

2 研究方法

2.1 观测估算

传统的水文学和生态学都需要对研究对象进行长期观测,观测也是生态水文学研究的重要手段,全球已经实施多个生态水文观测计划,建立生态水文观测站点。国外已经实施了“美国数字水文观测网站设计”、“美国国家生态研究站同位素监测计划(NEON)”、“朝鲜水汽通量和碳通量观测计划”^[11]、监测CO₂、H₂O通量的“欧洲通量计划(EUROFLUX)”等生态水文观测试验计划。国内在黑河流域不同景观带也建立了环境观测系统(ENVIS)。具体的生态数据样本可以定量或半定量进行采集。定量通常采用单元面积上的计数或单位体积的计数;半定量通常使用常规监测程序的一部分,即快速评估技术。河流水文数据采集可以通过多种途径:流速-面积法、示踪剂稀释、超声波法、电磁波法、流仪表、浮筒等方式^[2]。生态水文过程观测中:①仪器直接监测,或者需要进行进一步数据转换获得,其中例如,植被和土壤的蒸散可以通过站点蒸发器皿、蒸渗仪、涡度相关监测通量系统等等;②通过其他水量要素观测数据,用水量平衡原理的水文学方法、通过鲍文比-能量平衡法、Penman-Monteith公式等方法直接估算。而生态水文另一重要研究内容——生态需水量可以通过水量平衡法、定额估算法、植被耗水模式、潜水蒸发量等经验与半经验方法估算^[12],并在国内黑河流域、黄淮海地区进行例证^[13-14]。

2.2 对比和相关性分析

目前,在研究生态与水文关系的机理研究中,特别是土地利用与覆被变化(LUCC)引起的植被类型、结构等水文效应中,“对照流域”(paired-catchment)方法在小流域中运用较多(1 000 km²以下),通过建立校准期两个流域的回归方程,再改变一个流域的植被特征,进行两个流域的水文特征的比较^[15],但这种方法不适用于大流域^[16]。另外在同一流域,建立不同的土地利用斑块,研究不同的斑块水文特征,这种方法在澳大利亚的Burdekin流域已经进行了例证^[17]。

建立LUCC和水文特征相关关系是研究LUCC对水文影响的众多方法中最直接的方法。通过Bridget等人建立灌溉与地下水波动的相关关系,发现在灌溉农业生态系统中,地下水泄载量相对干旱的农业生态系统较高^[18]。Schilling在研究农作物对基流影响中,发现基流的增加与中耕作物强度的

增加成正相关^[19]。国内学者王文圣在传统的水文相关性分析基础上,基于学者赵克勤提出的集对不确定性分析方法,提出基于集对原理的水文相关性分析,将宏观相关关系与微观相关结构相结合,并用新疆伊犁河雅马渡站径流和总降雨量、平均纬向降雨环流指数等四因子数据进行检验,获得较好效果^[20],使得生态水文机理的分析更加合理可靠。

2.3 模型与遥感技术结合

2.3.1 生态水文模型 据1991-2003年的ISI Web of Knowledge Science Citation Index数据库统计文献分析,研究生态水文学的模型文章有15篇,占总文章数87的17.24%^[6]。因为生态水文动力机制的过程和现象数据过于巨大、环境和生物相互作用的动力机制复杂以及当前现象的时空变化尺度程度太大,导致分析生态水文问题的量化任务艰巨,生态水文系统模型具有挑战性^[21-22]。

联合国科教文组织(UNESCO)的“水文循环的生物圈方面(BAHC)”和国际水文计划(IHP),以及国际水文科学协会(IAHS)积极推进建立研究土壤-植被-大气连续体相互作用的模型^[12],几种典型生态水文模型简介如表3所示。集总式水文模型已经成功应用于土地利用变化对流域水文影响,例如THESEUS^[23]、NAM^[24]等集总式生态水文模型研究土地利用和气候变化对流域径流量的影响,但是却不能很好体现水文过程。而Hydrology Soil Vegetation Model(DHSVM)^[25]、THALES^[26]、SHETRAN^[27], and MIKE SHE^[28]等分布式生态水文模型研究点状和更加微观具体的水分循环过程,对评价土地利用径流响应方面具有预见性能力^[29],但是比集总式模型需要更多的数据输入^[30-31],更难校正、推理。

2.3.2 遥感方法 遥感在生态——水文研究和水资源管理方面的应用,主要体现在以下三个方面:①直接运用遥感图像识别水文重大事件现象,如洪水区域;②通过处理过的遥感数据提供水文参数,如降雨量,土壤湿度;③运用多源遥感数据量化地表参数,如植被类型和覆盖度^[32]。

随着遥感技术的发展,在生态水文过程研究中研究方向取得较好成果,例如通过遥感估算模型,估算区域蒸散发已广泛运用^[33]。Jing M. Chen等人在加拿大Saskatchewan一个小流域通过遥感估算流域蒸散结果,分析蒸散发的时间、空间分布特征,及差异性原因^[34]。并且利用遥感手段,通过影响处理法、摄影测量法和激光扫描法测量河流和晶粒的水深、地响和底质,进行河道内的生境评价^[2]。

表3 几种典型生态水文模型

| 模型名称 | 空间尺度 | 时间步长 | 模型结构 | 模型功能 |
|----------|-----------------------------|---------------------|---|---|
| RHESSys | 集水区 | daily | 基于 GIS, 分布式物理模型, 由 MTN - Clim, BIOME - BGC, TOPMODEL 模型改编而来 | 模拟碳、水和营养盐通量 |
| SIMULAT | 局域尺度 | hour - daily | 基于 SWAT 水文连续传输体连续的物理模型 | 模拟垂直水通量, 可以评价水和营养盐通量 |
| MIKE SHE | 流域尺度或者局部小尺度 | daily 或 sub - daily | 全分布式物理模型 | 模拟水文循环的整个阶段, 可以在地表水和地下水相互影响, 湿地动力机制, 点源和非点源水质污染研究 |
| VIC 模型 | 大尺度 | daily 或 sub - daily | 半分布式物理 | 模拟陆地 - 大气通量, 陆地表面水和能量平衡 |
| SWIM | 中尺度 | daily | 分布式水文模型 | 径流产生、营养盐和碳循环、植被生长、作物估产和侵蚀等生态水文过程 |
| DHSVM | 大陆和区域尺度 100 km ² | sub - daily | 分布式模型 | 模拟地形和植被水通量响应 |
| SWAT | 大流域 | Daily | 基于 GIS 分布式流域模型 | 模拟多种不同的水文物理化学过程, 如水量、水质以及杀虫剂的输移与转化过程 |
| SWAP | 田块尺度 | daily 或 sub - daily | 一维垂向模型, 包括 Recharge 方程、Von - Hoyningen - Hüne 方程等 | 用于土壤 - 植物 - 大气环境中水分运动、溶质运移、热量传输及作物生长的模拟 |
| HBV | 集水区 | daily | 半分布式 | 洪水预警, 评估水资源和营养盐输移 |

3 “生态水文学”研究展望概述

(1)生态水文学是水循环与生态系统相互关系的科学,而这种相互作用在水分驱动的区域尤为重要^[22],水资源如何分配将影响生态系统的存亡,基于探求水循环与生态系统相互作用机理,亟待生态水文学解释与水分驱动生态系统演化相关的重大问题,提供系统的工程方案,加强环境自我保护机制。

(2)在人类与生态系统的需水平衡中,需要研究地球水圈范围所有尺度的水文现象、过程以及水文与环境的相互作用,特别是以中、大空间尺度以及天、月、年时间尺度的流域水量平衡及水文过程模拟和洲际水量平衡研究。需要解决尺度转换问题,在有限的观测下,寻找生态恢复的合适尺度,通过模型尽可能描述真实物理界面^[12]。

(3)洪水、干旱等极端事件的频率和规模虽然可以加强生物多样性,但也可以带来生态系统毁灭性灾害^[35]。极端事件发生原因除了全球气候变化这一因素外,近百年来工业文明发展也驱动了水文和生态系统全球变化在,因此亟待开展极端事件对气候变化和人类活动的响应研究。

(4)现代生态系统不仅反应了现代的物质和能量交换,也包括了历史的信息。第四纪早期的气候 - 植

被区域的变化和人类依然对当前生态系统产生重要影响。过去的极端事件和潜在的未来气候变化一样,都可能需要在长时间序列中才能更好地理解。因此古生态学研究方法,具有识别长期水文演变的潜力^[36]。

参考文献:

- [1] Petts G E, Nestler J, Kennedy R. Advancing science for water resources management [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 565, 277 - 288.
- [2] 王浩, 严登华, 秦大庸, 等(译). 水文生态学与生态水文学: 过去、现在和未来[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [3] Zalewski M. Rationale for the “Floodplain Declaration” from environmental conservation toward sustainability science [J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2008, 8: 107 - 113.
- [4] Zalewski M. Ecohydrology: The scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources [J]. *Ecological Engineering*, 2000, 16(1): 1 - 8.
- [5] Newman B D, Wilcox B P, Archer A R, et al. Ecohydrology of water-limited environment: A scientific vision [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42.
- [6] David M Hannah, Paul J Wood, Jonathan P Sadler. Ecohydrology and hydroecology: A ‘new paradigm’ [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18: 3439 - 3445.
- [7] Hino M. Eco-hydraulics, an attempt. Tech. Report no. 22, Department of Civil Engineering [R]. Tokyo Institute

- of Hydrology,1977;29-59.
- [8] Mitsch W J. Ecological Engineering - a co-operative role with planetary life support system[J]. Environmental Science Technology, 1993,27;438-445.
- [9] Zalewski M, Janauer G A, Jolankai G. Ecohydrology: A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources. UNESCO IHP Technical Document in Hydrology No. 7. IHP - V Projects2. 3/2. 4[R]. UNESCO Paris, 1997,60(5): 823-832.
- [10] Hooghart J C, Posthumus C W S. The use of hydro-ecological models in the Netherlands[C]//. Proceedings and Information no. 47, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands, 1993.
- [11] 赵文智,程国栋.生态水文学研究前沿问题及生态水文观测试验[J].地球科学进展,2008,23(7):671-674.
- [12] 程国栋.黑河流域水-生态-经济系统综合管理研究[M].北京:科学出版社,2008.
- [13] 何志斌,赵文智,方静.黑河中游地区植被生态需水量估算[J].生态学报,2005,25(4):705-710.
- [14] 张远,杨志峰.林地生态需水量计算方法与应用[J].应用生态学报,2002,13(12):1566-1570.
- [15] 刘昌明,曾燕.植被变化对产水量影响的研究[J].中国水利,2002,10:112-117.
- [16] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance[R]. CRC for Catchment Hydrology Technical report, 1999;99-12.
- [17] Rebecca Bartley, Christian H Roth, John Ludwig, et al. Runoff and erosion from Australia's tropical semi-arid rangelands: influence of ground cover for differing space and time scales [J]. Hydrological Processes, 2006, 20: 3317-3333.
- [18] Bridget R S, Robert C R, David A S, et al. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US [J]. Global Change Biology, 2005, 11: 1577-1593.
- [19] Schilling K E. Relation of baseflow to row crop intensity in Iowa [J]. Agriculture ecosystems & environment, 2005, 105(1-2): 433-438.
- [20] 王文圣,李跃清,金菊良.基于集对原理的水文相关分析[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(2):1-5.
- [21] Laio F, Porporato A, Ridolfi L, et al. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrological processes and response to water stress. II. Probabilistic soil moisture dynamics [J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(7): 707-723.
- [22] Porporato A, Laio F, Ridolfi L I. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrological processes and response to water stress. III Vegetation water stress [J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(7): 725-744.
- [23] Wegehenkel M. Estimating of the impact of land use changes using the conceptual hydrological model THESEUS - a case study [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9-10): 631-640.
- [24] Jens Kristian Løftrup, Jens Christian Refsgaard, Dominic Mazvimavi. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: Case studies from Zimbabwe [J]. Journal of Hydrology, 1998, 205(3-4): 147-163.
- [25] Thanapakpawin P, Richey J, Thomas D, et al. Effects of land use change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand [J]. Journal of Hydrology, 2007, 334: 215-230.
- [26] Grayson R B, Moore I D, McMahon TA. Physically based hydrologic modeling, 1. A terrain-based model for investigative purposes [J]. Water Resour Research, 1992, 28: 2639-2658.
- [27] Ewen J, Parkin G. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts [J]. Journal of Hydrology, 1996, 175: 583-594.
- [28] DHI (Danish Hydraulic Institute). MIKE SHE water movement: user manual [M]. Hørsholm, Denmark, 1999.
- [29] Sangjun Im, Hyeonjun Kim, Chulgyum Kim, et al. Assessing the impacts of land use changes on watershed hydrology using MIKE SHE [J]. Environmental Geology, 2009, 57: 231-239.
- [30] Beven K J. Changing ideas in hydrology: the case of physically based models [J]. Journal of Hydrology, 1989, 105: 157-172.
- [31] Refsgaard J C. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models [J]. Journal of Hydrology, 1997, 198: 69-97.
- [32] Kite G W, Pietroniro A. Remote sensing applications in hydrological modeling [J]. Hydrological Sciences, 1996, 41: 563-591.
- [33] 张万昌,高永年.区域土壤植被系统蒸散发二源遥感估算[J].地理科学,2009(4):53-528.
- [34] Chen J M, Chen X Y, Ju W M. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs [J]. Journal of Hydrology, 2005, 305: 15-39.
- [35] Naiman Robert J, Decamps Henri. Riparian forest ecotones, land-water interactions, and watershed management [J]. Bulletin of the Ecological Society of America, 1993, 74(2): 371-372.
- [36] Greenwood M T, Wood P J, Monk W A. The use of fossil caddisfly assemblages in the reconstruction of flow environments from floodplain paleochannels of the River Trent, England [J]. Journal of Paleolimnology, 2006, 35(4): 747-761.