

关于流域生态水文学研究的思考

Thinking about Watershed Eco-hydrology Research

章光新/ZHANG Guang-xin

中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012

Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China

[摘要] 流域生态水文学是以流域为研究单元,应用生态水文学的理论思维和系统科学的方法,探求流域水资源持续利用与水环境安全管理的一门新型学科。重点论述了流域自然地理要素演变对生态水文格局与过程的影响机理、流域生态水文格局与过程对土地利用和管理的响应机制以及建立特色流域生态水文模型的构思,并就流域生态水文学急需研究的重要科学问题作了详细的阐述和探讨,旨在为保证流域社会经济与生态环境协调、稳定、可持续发展提供科学依据和决策指导,加快我国小康社会建设的进程。

[关键词] 流域生态水文学;生态水文格局;生态水文过程;生态水文模型;自然地理要素

[中图分类号] P343

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)12-0042-03

Abstract: Watershed eco-hydrology is a new subject applying the theory and scientific method of eco-hydrology to grope after sustainable water resources development and safe water environment management at the watershed-scale. Several key scientific issues of watershed eco-hydrological research, which may ensure that eco-environment and socio-economy develop harmoniously, consistently and continuously, were discussed. They are as follows: ① the influence mechanisms of natural geography factors on the eco-hydrological patterns and its processes; ② the responding mechanisms of the eco-hydrological patterns and its processes on the land utilization and management; ③ the conceived of characteristic eco-hydrological model.

Key Words: watershed eco-hydrology; eco-hydrological patterns; eco-hydrological processes; eco-hydrological model; natural geography factors

CLC Number: P343

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)12-0042-03

流域作为人类活动和环境过程的功能地理区域^[1-4],直接关系到一个地区甚至一个国家的社会经济可持续发展和生态环境安全。目前,由于全球气候变化和人类活动的强烈影响,流域的可持续发展面临着严峻的挑战。首先,气候变化和人类活动严重地扰乱了流域水循环和生物循环的动态平衡。其次,流域水管理主要采用机械的水文工程方法,没有考虑流域尺度的水循环对生物地球化学演化的作用^[5]。如在我国众多流域中因大规模进行水利工程建设而带来的水循环短路化、绝缘化及生态系统的孤立化等一系列问题,严重制约着流域社会经济可持续发展^[6]。因此,我们必须采用生态水文学的理论思维和系统科学的方法来研究流域水文系统与生态系统、水循环与生态过程之间的相互作用关系,确保流域社会经济与生态环境协调、稳定、可持续发展,加快我国小康社会建设的进程。

1 流域生态水文学研究的内涵

流域生态水文学 (Watershed eco-hy-

drology)是以流域为研究单元,应用生态水文学的理论思维和系统科学的方法^[7],在时空尺度上研究生态过程与水文过程相互影响、相互作用、共同耦合演进的过程、机理和机制,探求流域水资源持续利用与水环境安全管理的一门新型学科,最终目标是流域社会经济与生态环境协调、稳定、健康发展提供科学依据和决策指导。

流域不仅是土地利用综合评价与管理的基本地理单元^[8],同时也是生态水文学研究的最佳尺度。目前,流域土地利用/覆被变化 (LUCC) 和生态水文学的研究是国际地圈-生物圈计划 (IGBH) 重要的组成部分之一^[9]。其中,生态水文学是在 1992 年 Dublin 国际水与环境会议上正式提出的,是描述生态格局和生态过程的水文学机制的一门学科,其生态水文格局、生态水文过程与生态水文模型是重点研究内容^[10-15]。两者之间的联系是因为土地利用/覆被变化能影响流域范围内径流、蒸腾、入渗和降水,然而,流域水循环必将影响和改变生态格局和生态过程,以及土地利用和相关的管理方法的

选择。

2 流域自然因素对生态水文格局与过程的影响机理

2.1 自然营力与地质环境塑造了流域基本的生态水文格局

陆地表层系统在自然营力作用下,如第四纪新构造运动、火山地震等,其结构物质、地形地貌、水文地质环境等要素都发生了巨大的变化,塑造了流域基本的生态水文格局,同时原本的生态水文过程产生了紊乱,在新的驱动机制作用下,生态过程与水文过程相互作用,共同演变成相对稳定的生态水文格局。因此,研究流域自然演变历史对深刻认识近代生态水文过程有着重要的指导意义。

重点是从时间序列上研究流域水文系统构造环境的演变、水文循环和水质演化的过程与规律、生态系统演替的规律及其趋势,尤其是加强对河流的洪泛平原的地质历史研究。洪泛平原是人类聚居和生产活动的主要场所,具有较高的生产力。同

收稿日期:2006-06-15

基金项目:中国科学院知识创新项目(KZCX2-SW-320-2)

作者简介:章光新,男,长春市高新区蔚山路 3195 号,研究员,主要从事水文水资源与生态领域的研究;E-mail:zhgx@neigae.ac.cn

时,它是流域构造运动和水文过程演变的产物,洪泛平原的历史和结构决定洪泛的空间格局(方式)和地下水循环、补给区和水质,可见认识洪泛平原的地质历史是理解近代生态水文过程的基础^[16]。

2.2 流域自然地理要素演变对生态水文动态的影响

流域的气候、第四纪沉积与土壤、地形地貌等自然地理要素的演变,对生态水文动态有着深远而重要的影响^[17]。水是维持生态系统平衡的重要因子,流域空间地理位置的不同,气候要素(降水量、蒸发量和温度等)也随之发生变化,直接影响着流域水循环过程和植被分异规律,如在不同类型流域——西北干旱区内河流域、南方热带雨林区流域、东北半干旱内陆河流域等,各自具有独特的水循环特征和生态水文景观。地表第四纪沉积对流域水循环条件有很强影响,直接影响到含水层的渗透系数、持水能力和潜在的地表地下径流^[18]。土壤是植被生产的母体,营养元素和水分都是从土壤中汲取的,同时土壤的理化性质直接影响到界面水文通量和水质。流域的地形地貌不仅界定水的范围(面积、水域),而且坡度降直接影响着物质流(如能量、物质和信息)的传输方向、速度和时间。流域边界可以影响到局部的气流和气候、迁徙流和物种分布的相关格局,以及污染的扩散流^[19]。

研究的主要问题有:①重点开展全球气候变化的区域水文响应、降水时空分异规律及其与生态系统耦合关系的研究,预测流域水文情势演变趋势及其对生态系统的影响机制;②加强流域赋水空间(土壤、地下含水层)水力特征时空演化对水文通量的影响研究,定量计算径流对频率分布和土壤水力特征的空间结构的敏感性^[21];③利用流域数字高程模型DEM,提取重要水文特征参数,如坡度、坡向、流域界线、汇流网格等,建立流域分布参数水文模型和溶质迁移转化模型,预测变化环境下的水文水资源演变趋势,揭示物质流的传输途径、梯度变化速率以及最终归宿。

3 流域生态水文格局与过程对土地利用和管理的响应机制

流域作为一个完整而连续的自然综合体,其生态水文格局也具有连续性,主要表现在水文系统的连续性、生态系统的连续性、水域与陆域的连续性、陆域的连续性等方面^[6]。但是,在大规模无序的人类活动作用下,流域生态水文格局的连续性遭到破坏,生态水文过程发生急剧的变化,流域生态水文系统的内部结构和功能产生弹性变化,通过自身调节,达到稳定状态,有时超越弹性限度可导致整个系统的瓦解和崩溃。

3.1 土地利用/覆被变化(LUCC)对流域生态水文格局与过程的影响

流域土地利用/覆被变化(LUCC)是一

个相当复杂的过程,可从逐渐转变(外来种群逐渐入侵)到整个改变(草地转变为森林和耕地)^[19],直接作用于生态景观格局,景观格局中的植被可以在多个层次上影响降水、径流、蒸发和入渗,从而对水资源进行重新分配,由此影响和改变了流域水文循环过程。Graham Jewitt认为,在流域中土地利用的作用是至关重要的。土地利用使降水分成两部分:①“绿水”通过蒸腾作用由水蒸汽流向大气;②“蓝水”流到河流中或补给地下水。水文过程对流域土地利用具有高度敏感性,因此,水资源综合管理必须考虑水资源系统的土地利用和管理因素,它是实现水资源可持续利用的成功关键^[19]。土地利用方式的变化也可直接导致水资源的利用方式和强度的改变,如在半干旱地区的雨养旱田改为灌溉水田,主要靠过度抽取地下水来灌溉,导致水位下降,形成降落漏斗,同时加速地下水与地表水体之间的水量交换。水利工程建设,可直接破坏流域的连续性,导致流域水循环短路化、绝缘化及生态系统的孤立化,紊乱生态水文格局和过程。土地覆被的变化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^[20-21]。

由上可见,运用“3S”技术和模型技术,加强流域土地利用/覆被变化条件下的生态水文效应研究,模拟不同土地利用情景下的生态水文过程,揭示生态-水文相互作用机理,为土地合理利用与退化的生态环境恢复重建提供了科学依据。

3.2 流域生态水文格局与过程在水环境安全调控中的作用和功能

流域生态水文格局与过程在水环境安全调控中的作用和功能主要体现在以下两个方面。

1) 流域的淡水生态系统与营养负荷

淡水生态系统被认为是四维结构系统,环境变量的空间格局和生物数量由纵向、横向、垂向和时间梯度来决定,它们之间通过水、能量和物质通量来联系^[19]。水是地球表层系统中的物质和能量传输的载体,水文过程可以通过各种水文要素,如水位、流速、流量等影响营养物质在淡水生态系统的分布和富集。A. Hillbricht-Ilkowska等学者认为,在流域水平方向上,水-营养元素的运移系统被陆地景观的结构,也就是陆地的形态(地貌结构)、土地利用(已耕种的土地,可耕地)和土地覆被所决定。淡水生态系统周围的湿地、洪泛平原可通过改变地表径流和水文格局来影响地下水的补给、径流和排泄,在控制和降低营养物的沉积、运移、营养负荷,以及净化水质量等方面具有重要作用。

2) 土地不合理利用和管理带来的人为污染

土地利用带来的点源与面源污染已引起国际社会的关注和重视。流域作为土地

管理和社会经济发展的基本单元,土地不合理利用和管理给流域生态水文系统带来了严重的污染,在我国七大江河流域系统均遭受不同程度的污染。目前,国际上盛行合理利用自然湿地或构建人工湿地来处理污染物、净化水质,这是人为利用生态水文格局和过程来调控区域水环境安全的一种新型模式。

针对上述科学问题,建议重点开展以下研究工作:①流域系统营养元素/盐分(盐渍土区)时空分异规律、运移机理以及生态水文格局和过程的耦合关系;②流域生态水文过程及其演变机制,构建合理的生态水文格局,处理人类活动造成的污染;③流域水文系统及其水文化学过程对植物的成分、结构、分布和演替的影响^[22]。

4 建立流域生态水文模型的构想

流域生态水文模型是在揭示流域生态水文过程机理的基础上,建立的预测植被类型或植物群落对水文生境或水文地球化学生境变化的响应模型^[23],为政府提供土地利用与管理的理论依据和科学决策。

4.1 生态水文模型研究进展简介

生态水文模型已成为国际水文计划(IHP)和国际地圈-生物圈(IGBP)的热点研究课题。20世纪80年代中期,土壤-植被-大气连续体(SPAC)概念引入我国,以刘昌明院士为首的科学家们以农田生态系统为主要研究对象,就SPAC系统界面的水分过程、通量的估算模型以及能量物质交换等方面开展了系列研究工作。90年代中后期,我国学者注重作物耗水规律和节水农业技术的研究^[24]。此外,夏军教授等人研制了水-生态耦合模型,成功地应用于博斯腾湖水资源的可持续管理^[25]。国际上成功开发并应用的主要生态水文模型有以下几种。①荷兰开发的陆地生态系统生态水文影响评价模型-ITORS,描述植物种群和生境因子(如土壤、地下水和土地管理)之间的相互关系,可用来评价人类活动引起环境变化条件下的植物种群响应机制,以及用来计算水文变化的生态效应的DEMNET生态水文模型^[26-27]。②澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)研发的分布参数水文模型(TOPOG_IRM),用来预测流域尺度上土壤-植被-大气系统界面的水分过程、碳循环以及物质与能量通量^[28]。③IAHS建立了各种尺度的“植物-土壤-大气”相互作用模型,适合不同生态类型的大尺度生态水文过程模拟模型不断被提出和应用,SVAT(土壤-植被-大气)传输模型在各种尺度上得以迅速发展,通过对陆地生态系统的不同参数化处理,形成了种类繁多的生态水文过程模拟模型。如德国开发的中尺度生态水文模型SWIM(Soil and Water Integrated Model)是用来研究分析气候变化的区域响应,在流域尺度上综合了水文、植被、侵蚀和氮的动态变化^[29-30]。④ICHORS生态水文

模型，用来预测化学和水文生物因子对植物种群响应的影响。⑤ 地下水对地表生态有一定的控制作用，与植被群落结构、种类和其他生态特征之间的关系十分密切，近期发展了针对地下水生态过程的多种模拟模型，如 MXW 以及 IRM 等。此外，还有 TOPMODEL、PATTERN、NTM、MOVE、HYVGE 等生态水文模型。

4.2 建立特色的流域生态水文模型

根据流域人类活动的干扰程度，可将流域大致分为人工化、半人工化、自然状态 3 种类型流域。重点研究植物群落多样性与环境要素以及人类活动相互作用关系，选择对植物生长和种类分异贡献率大的环境要素作流域生态水文模型类型变量（如植物种群、土壤、水文、土地管理、气候）。通常大部分流域生态系统是土壤、水文、气候与人类活动的综合体。其中，水文和土壤条件控制着许多环境因子（包括氮的可获取量、盐分、有机物质的分解、矿化速率等），因此，主要变量可划分为几个子变量（如土壤包括结构、化学、含水量，水文包括水化学、水文区、地下水埋深、水位上升速率等）^[31]。采用数理统计方法和先进的模型技术，建立有特色的流域生态水文模型，预测植物种类和群落对环境要素和人类活动的响应态势，为退化生态系统的恢复重建以及政府有关部门水土资源管理，提供科学依据和实践指导。

5 结束语

流域生态水文学是在人们认识流域作为人类活动和环境过程的功能地理区，也是社会经济发展和土地管理的基本单元的背景下诞生的，它是保证流域水资源持续利用与水环境安全管理的理论依据和实践工具。在理论体系和研究方法上需要不断地对其改进、完善和发展，尤其在流域生态水文学研究的内涵、变化环境下流域水循环的生态水文学基础研究^[32]、流域尺度与生态水文尺度的配比拟合关系，以及生态水文模型的经验—统计、专家知识（等级划分）、黑箱关系应该向定量化发展等方面，需要深入研究和探讨。在实践应用方面，应该首先在我国干旱、半干旱地区和盐渍土区开展流域生态水文学的研究，因为那里的流域水循环和生态环境都比较脆弱。

参考文献(References)

[1] HASLAM M, NEWSON M. The potential role for NELUP in strategic land use planning [J]. Journal of Environmental Planning and Management, 1995, 38(3): 137–141.
[2] WALKER J, REUTER D G. Indicators of catchment health: a technical perspective [R]. Melbourne: CSIRO Publishing, 2001.
[3] HAMBLIN A. Environmental indicators for national state of the environment reporting

[R]. The Land Australia: State of the Environment (Environmental Indicators), 1998.
[4] COMMITTEE ON WATERSHED MANAGEMENT. New strategies for America's watersheds [R]. Washington DC: National Academy Press, 1999.
[5] MACIEJ ZALEWSKI. Ecohydrology—the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources [J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 1–8.
[6] 刘树坤. 中国水利现代化和新水利理论的形成[J]. 水资源保护, 2003, 19(2): 1–5.
[7] 阎水玉, 王祥荣. 流域生态学与太湖流域防洪、治污及可持续发展 [J]. 湖泊科学, 2001, 11(1): 1–7.
[8] Environmental Protection Agency (EPA). Landscape monitoring assessment research plan [R]. US EPA 620/ R -94/ 009, 1994.
[9] BRAD BASS, RALPH E, BYERS, et al. Integrated geographical assessment of environmental condition in water catchments: linking landscape ecology, environmental modelling and GIS [J]. Hydrological Processes, 2000, 59(4): 299–319.
[10] RODRIGUEZ-ITURBE. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress I, scope and general outline [J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(7): 695–705.
[11] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述 [J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1851–1857.
[12] 赵文智, 程国栋. 生态水文学——揭示生态格局和生态过程水文学机制的科学 [J]. 冰川冻土, 2001(4): 450–457.
[13] ANDREW BAIRD, ROBERT WILBY. Ecohydrology [M]. London: Routledge Press, 1999.
[14] RODRIGUEZ-ITURBE I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics [J]. Water Resources Research, 2000, 36(1): 3–9.
[15] MACIEJ ZALEWSKI. Ecohydrology—the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources [J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 1–8.
[16] WILCHELM L F, BRINKMANN, ARTUR MAGNUSZEWSKI, et al. The structure and function of the Vistula River floodplain near Plock, Poland [J]. Ecological Engineering, 2000, 16(4): 159–166.
[17] ROBERT BACKHAUS, MICHAEL BOCK, STEFAN WEIERS. The spatial dimension of landscape sustainability [J]. Environment, Development and Sustainability, 2002, 4 (3): 237–251.
[18] HILLBRICHT-ILKOWSKA A, RYBAK J, RZEPECKI M. Ecohydrological research of lake-watershed relations in diversified

landscape (Masurian Lakeland, Poland) [J]. Ecological Engineering, 2000, 16 (1): 91–98.
[19] GRAHAM JEWITT. Can integrated water resources management sustain the provision of ecosystem goods and services? [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(11–22): 887–895.
[20] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 580–587.
[21] HERBST M, DIEKKRUGER B. The influence of the spatial structure of soil properties on water balance modeling in a microscale catchment [J]. Physical and Chemistry of the Earth, 2002, 27 (9–10): 701–710.
[22] BAIRD A J, WILBY R L. Eco-hydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments (book reviews). 1999: 7–8.
[23] HARRY OLDE VENTERINK, MARTIN J WASSEN. A comparison of six models predicting vegetation response to hydrological habitat change [J]. Ecological Modelling, 1997, 101(2–3): 347–361.
[24] 于贵瑞, 王秋凤. 我国水循环的生物学过程研究进展 [J]. 地理科学进展, 2003, 22(2): 111–117.
[25] 贾绍凤, 王 国, 夏 军, 等. 社会经济系统水循环研究进展 [J]. 地理学报, 2003, 58(3): 255–262.
[26] ERTSEN A C D. Ecohydrological impact-assessment modeling: an example for terrestrial ecosystems in Noord-Holland [J]. The Netherlands. Environmental Modeling and Assessment, 1999, 16(4): 13–22.
[27] REMCO VAN E K. Ecological effects of water management in the Netherlands: the model DEMNAT [J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 127–141.
[28] WARRICK R, DAWES. Evaluation of a distribution parameter ecohydrological model (TOPOG-IRM) on a small cropping rotation catchment [J]. Journal of Hydrology, 1997, 191(1–4): 64–86.
[29] 王根绪, 刘桂民, 常 娟. 流域尺度生态水文研究评述 [J]. 生态学报, 2005, 25 (4): 892–903.
[30] VALENTINA KRYSANOVA. Mesoscale ecohydrological modelling to analyse regional effects of climate change [J]. Environmental Modeling and Assessment, 1999, 15(4): 259–271.
[31] RAMSIS SALAMA. Hydrological response unit of the Ord Stage irrigation area and the dynamic filling of aquifers of the Ivanhoe and Packsaddle Plains [R]. CSIRO Land and Water Technical Report 07/02, 2002.
[32] 夏 军, 孙雪涛, 谈 戈. 中国西部流域水循环研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2003, 18 (1): 58–67.

(责任编辑 李向荣)