

生态水文过程对水环境影响研究述评

严登华¹, 何 岩², 王 浩¹, 秦大庸¹, 王建华¹

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044; 2. 中国科学院, 北京 100864)

摘要: 当前生态水文过程对水环境影响的国内外研究主要包括生态水文过程的形成、基于生态水文格局分析的生态需水研究、流域尺度上生态水文过程对水文、水质和水生态的影响以及理论、方法与模型研究; 但这些研究尚未过渡到生态水文过程的揭示上来, 我国的生态水文学研究尤为薄弱。未来生态水文过程与水环境安全调控研究中的主要议题包括: 生态水文过程形成、演化及驱动机制分析; 基于生态水文过程的生态需水时空分异; 流域生态水文过程对地表水水质分异的影响; 流域生态水文过程与水的生态空间变化; 近海陆域生态水文过程与近海水质调控; 基于现代地理信息技术的生态水文模型研究; 基于水环境安全的生态水文决策与管理研究。

关 键 词: 生态水文过程; 水环境安全; 述评

中图分类号: X143; G853.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)05-0747-06

在全球水危机及难求优解的背景下, 在生态学和水文学的基础上, 生态水文学得以产生, 并在国际大型研究计划(如 UNESCO/ IHP, FRIEND, HELP 等)的支撑下得以快速发展, 已在世界范围内广泛开展起来。自然和人类活动综合作用下的生态水文过程, 影响和改变了水循环及物质在环境中运移和转化的各要素过程, 从整体上控制着流域水环境的发展演化。当前生态水文学在水资源和水环境综合管理中的应用研究还处在初期阶段^[1~4]。

纵观国内外生态水文过程对水环境影响机制研究, 主要是从水环境中生态水文过程的形成暨生态过程与水文过程的耦合作用机制、流域生态水文过程控制下的生态需水分析、流域尺度上生态水文过程对陆地水域的水文、水质和水生态的影响以及相关理论、方法和模型研究等方面展开的。

1 水环境中生态水文过程的形成——生态过程与水文过程的耦合作用机制

生态过程和水文过程耦合作用的敏感区位于陆地水域、水陆交错带(狭义湿地)、森林和干旱区, 这些区域也是进行生态水文过程综合研究的关键领域。生态水文过程研究的核心是生物与水分之间的关系^[5]。

早期的生态水文过程研究, 主要是从渔业开发的角度, 研究河流湖泊水文情势(包括河流水位梯度、基流、流速; 湖泊水位波动和湖流等)对鱼类种群结构和功能、产量的影响^[6]。随着人类对水循环各要素过程影响的深入, 特别是通过下垫面的改造和水利工程措施, 影响和改变了蒸散发及地表产汇流过程; 这些水文过程的生态响应也凸现出来, 相关的生态水文过程研究也迅速发展起来。如在水库修建和运行的过程中, 因水动力学条件的改变, 使得其上下游的河流生态格局和过程发生了深刻的变化, 为维护区域的生态安全, 需通过水库调度, 调节水库上下游的生态结构和过程^[2]。在自然和人类活动的综合影响下, 湖泊上游的水文过程和物质运移

收稿日期: 2004-04-20; 修订日期: 2004-07-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(G1999043602)

作者简介: 严登华(1976-), 男, 安徽太湖人, 博士后, 主要从事生态水文学与水资源水环境研究。

E-mail: denghuay@126.com; yandh@iwhr.com

转化过程被改变,导致湖泊的水文过程和环境状况发生了深刻变化,湖泊生态系统结构也相应发生变化,湖泊环境在恶化。在当前湖泊的综合治理过程中,从生态水文学的角度出发,通过水调度等相关措施,调整湖泊的水文过程和生态系统结构,已成为湖泊综合治理中的一个新视角。

国内外从湿地的生态过程、水系统与水过程等方面对湿地生态水文过程开展了大量研究;当前研究重点包括以下几个方面:

- (1) 湿地植物对积水环境的适应机制;
- (2) 水分有效性和水分状况对湿地植物的分布和湿地植被组成的定量影响;
- (3) 湿地植物对所栖湿地的水文特征的影响;
- (4) 水质(化学成分)对湿地植物分布作用。

洪泛平原作为一种特殊的湿地,它是坡面径流进入河道或湖泊的最后屏障,在河流生态系统的保育、生物多样性保护、河流水文调节以及河流水质演化方面有着其独特的功效;同时,洪泛作用形成的洪泛区具有独特的地理与生态分异特征,它是生态水文耦合机制研究的最佳靶区,在国内外的相关研究中已从不同的侧面进行了初步研究^[7,8]。

目前国内外的生态水文过程研究,还是从资源衰竭和环境退化的被动治理角度探索其生态水文机制,尚未过渡到真正意义上的主动增加水环境的抵抗、恢复和缓冲能力上来,而这却是水环境综合治理的必然所在。

2 基于生态水文过程的生态需水研究

生态需水维系着流域的生态安全、水安全,是生态水文学在水资源/水环境研究中应用的关键科学问题之一,并在各国广泛开展。生态需水源于为维持河道内鱼类生存而开展的河道基流(Base Flow)研究;之后发展到河岸带(Riverine)生态需水,直到现在开展的流域尺度、区域尺度上生态需水研究^[4]。国内外学者从生态需水研究重点、方法以及水资源等多个角度提出了多种生态需水的分类系统。根据地貌部位的不同,生态需水可划分为河道系统生态需水和坡面系统生态需水;本文从河道系统生态需水和流域/区域尺度上生态需水的整体研究两个方面,对基于生态水文过程的生态需水研究进行述评。

2.1 河道系统生态需水

河道系统生态需水研究是国内外生态需水研究的核心,当前主要是从水文学、河流地貌学、环境学、生物毒理学和生态水文学的角度进行概算与定额。

河道系统生态需水研究方法可分为流量与水力计算法、栖息地法、水质模拟法及这几类方法的综合。流量和水力计算法主要包括 Q10 法、Tennant 法、R2CROSS 法、BBM 法(Building block methodology,“积木”法)和湿周法,其中 Tennant 法是在美国和日本得到广泛应用的确定河道生态需水方法之一。Tennant 法中河道流量推荐值以预先确定的年平均流量的百分数为基础,通常作为在优先度不高的河段研究河道流量推荐值使用,或作为其它方法的一种检验;该法已在美国 16 个州得到使用。栖息地法主要包括 IFIM 法(Instream Flow Incremental Methodology, 河流流量增加法)和 CASIMIR 法(Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements in Diverted Stream, 变迁河道需水计算机辅助模拟模型法),其中 IFIM 法是应用比较广泛的环境需水量研究方法,在美国的 24 个州得到广泛使用。IFIM 法是根据现场数据如水深、河流基质类型、流速等,采用 PHABSIM (Physical Habitat Simulation, 自然生境模拟模型)模拟流速变化和栖息地类型的关系,通过水力学数据和生物学信息的结合,决定适合于一定水生生物及栖息地的流量。水质模拟法是在一定的水质要求下根据污染物的迁移转化来确定河流生态需水量,这种方法在我国污染较为严重的一些流域的生态需水核算中得到了广泛使用。另外,在我国“十五”科技攻关项目(2001BA610A-01)研究中,从河流地貌学的角度(河形)对中国分区生态需水标准进行了概算。

以上各种方法在数据要求、方法、生态假设以及河流水力学方面的要求都有一定的区别。流量与水力计算

法及水质模拟法可根据现有的水文和水质模拟模型进行计算，比较容易得到河道的生态需水量；栖息地法的特点是说明栖息地如何随着河流流量的变化而变化，虽然提供了一种非常灵活的估计河流流量的方法，但不容易被应用。

2.2 流域/区域尺度上生态需水的整体研究

对于流域或区域尺度上生态需水的整体研究，我国干旱区生态需水的相关研究走在了世界的前列。1989年汤奇成等在分析塔里木盆地水资源与绿洲建设问题时首次提出了生态环境用水的概念。1993年在水利部组织编制的《江河流域规划环境影响评价》(SL45-92)行业标准中，将生态环境用水正式作为环境脆弱地区水资源规划中必须予以保证的用水类型。20世纪90年代后期之后，国家“九五”科技攻关项目“西北地区水资源合理利用与生态环境保护(96-912)”建立了基于二元模式的生态环境用水计算方法。1999年中国工程院开展的“中国生态环境建设与水资源保护利用”专题研究中，就我国生态环境用水进行了较为深入的研究，界定了生态环境用水的概念、范畴及分类。国家“十五”科技攻关(2001BA610A-02)的专题研究中，从水分-生态相互作用机理的角度研究了黑河下游的生态需水。

目前流域/区域尺度上生态需水的整体性研究的方法大多是基于流域蒸发特征以及水量平衡而进行估算。近年来在农业水资源的综合利用从灌溉定额的角度对流域农业景观的生态需水进行一些研究；从湿地健康与水平衡的角度也对湿地生态需水做了初步研究。

虽然有关生态需水的研究已经有60多年的历史(自20世纪40年代始)，但在流域水资源综合管理中的应用还处于初期阶段；对生态需水的内涵尚未有明确的界定。生态需水研究对象是生态系统，其研究必须从生态过程发生发展的全过程来考虑，受到生态系统的类型、发育阶段和健康状况制约；同时生态需水还与一定阶段的生态目标有关。在当前竞争性的水使用过程中，短期内的生态需水难以得到彻底满足；需从生态系统风险管理角度，研究不同风险程度下生态需水的时空分异，以便水资源的综合调度与管理。

3 流域生态水文过程对水域水文、水质与水生态的影响

从地貌分异特征来看，流域是河流/湖泊演化的腹地，流域内生态过程和水文过程的变化都会从河流/湖泊的理化和生态学特征方面得以显示。现代人类活动对河流/湖泊的影响，一方面是对河流/湖泊的直接作用；另一方面是通过对流域内生态过程和水文过程的干预而对河流/湖泊产生影响。对比这两个方面的作用，后一方面更具有潜在性且更为强烈。早期的河流管理，关注的对象是河流，而未延拓到其大背景——流域，使得在很多情况下河流管理达不到预期的目的。从流域边界(分水岭)到河流的中泓线做一剖面，若仅仅从河道系统尺度上进行河流管理，从地域分异的角度来说，就是流域尺度上的末端治理。随着全球范围内土地利用/覆被变化(LUCC)研究的日渐深入，流域尺度上生态水文情势对河流理化和生态学特性的影响才引起人们的重视，特别是近年来兴起的流域生态学研究，推动了该领域研究的进一步深入^[6,9,10]。流域尺度上生态水文过程对水域水文、水质和水生态的影响机理研究主要包括流域生态格局/过程变化的水文效应、流域生态格局/过程变化的水质效应以及流域尺度上生态水文过程变化对水域水生态的综合影响。当前流域尺度上生态格局/过程变化的水文效应研究刚刚起步，目前还处于统计学规律的寻求和数理模型的建立上。流域生态格局/过程变化对水质的影响主要是从非点源污染的角度加以研究，分析一定景观格局下非点源污染物负荷量的变化，而尚未考虑到流域的生态水文过程特别是流域的生态过程的影响。

流域生态水文过程对水体理化生特征的变化研究是进行流域综合治理的关键所在，在UNESCO/IHP-VI阶段的研究计划中，强调了基于LUCC的河流管理中的生态水文学方法与模型的应用。但在当前的研究中，主要是从机理角度进行初步探寻，尚未过渡到应用阶段；而且，目前大多数研究靶区是流域的一部分(Segment)，而尚未考虑流域这个整体。同时，流域生态水文过程的发生与河流理化生特征的变化具有一定的阶段性，在当前的研究中尚未涉及到该方面的科学内蕴。

4 基础理论、方法与模型研究

生态学和 hydrology 均为一独立的学科, 在学科的产生和发展过程中形成了各自的理论框架, 具有为本门学科研究服务的概念和研究尺度体系。作为交叉学科的生态水文学研究的首要问题就是要解决好生态学和 hydrology 在水问题研究中的分歧, 基础理论研究必须分析 hydrology 和生态学的基本概念, 以及他们怎样才能匹配, 实现生态学与 hydrology 的“无缝整合”, 这将为发展统一的概念体系奠定一致的理论基础。近期生态水文学的研究关键仍然是开展生态水文学的基础理论研究, 要消除生态学和 hydrology 的分歧, 形成统一的术语体系和研究尺度, 进而进行生态水文过程演化规律及其在水资源可持续开发中的应用。由于学科研究的继承性, 基础理论研究估计要很长的一段时间才能完成。当前生态水文学研究也尚未形成完整的方法体系, 目前主要是根据研究目的和研究环节的需要, 综合运用生态学和 hydrology 的方法; 为探寻生态学和 hydrology 的耦合机制, 统计学和确定性模型的分析方法在当前的研究得到了广泛的应用^[6]。

生态水文过程的水环境效应, 表现为微观过程的宏观表征, 要在分析生物-水分机理的基础上, 进行区域上的综合和信息化管理, 这也是近年来地球系统科学研究的总体发展趋势。对于机理研究, 在集成生态学、hydrology、生物生理学、环境科学、地球化学等多学科研究方法的基础上进行综合模拟与分析。对于区域上水调配及宏观管理, 要将微观机理应用到宏观研究中, 不但要进行海量生态水文参数和环境参数的实时动态的获取和分析模拟, 还必需进行尺度转换, 现代地理信息技术为此带来了契机; 同时还应值得提出的是, 可采用地理信息系统, 以生态过程和水文过程都非常相似的均质单元为空间研究尺度, 能初步弥补生态学和 hydrology 在研究尺度方面不吻合的缺陷。

生态水文模型的建立是实现生态水文学纵深发展的关键所在。从广义上说, 所有涉及生态水文过程的模型都可称为生态水文模型, 这包括当前所有的生态学和 hydrology 模型以及它们的综合; 从狭义上说, 揭示生态水文过程的模型才是生态水文模型。当前有代表性的生态水文模型系统主要是 MIKE-SHE 模型、SWAT 模型、DELFT 模型、SPLASH 模型等^[5]。传统的 hydrology 和生态学具有强大的“模型库”, 为生态水文模型的建立奠定较为坚实的基础, 使得其在当前的生态水文学研究中异军突起。但从建模的层次来看, 大多数模型还处在对 hydrology 模型和生态学模型的借鉴和综合运用上, 尚未从生态水文过程的角度建立一些机理模型。生态水文过程对水环境的影响模型当前主要是从流域非点源污染模拟方面展开的, 主要考虑的是物质的物理运移^[4,11,12]。

5 未来生态水文过程与水环境安全调控研究中的主要议题

5.1 生态水文过程形成、演化及驱动机制分析

从水文循环和生物演化的角度来看, 太阳能是流域生态水文过程形成演化的源动力, 人类活动对这些过程起诱导作用。自然条件/动力和人类活动有着明显的时空分异特征, 使得生态水文过程的形成演化具有一定的时间性和地域性。影响生态水文过程形成演化的因素很多, 可划分为条件因子和驱动因子, 这些要素的不同组合及其相互作用形成了生态水文过程的驱动机制。研究生态水文过程形成演化的时空规律及其驱动机制, 将是对其进行科学调节/优化的关键。

5.2 基于生态水文过程的生态需水时空分异

生态需水的核算是进行流域/区域水资源有效调配的关键, 而流域生态水文过程制约着生态需水的时空分异及其满足程度。生态需水的最终目的就是要在流域内进行合理的水资源配置, 在进行流域生态过程综合评价的基础上, 确立合理的时空研究尺度, 分析流域生态需水的时间和空间分异特征, 并将其与流域水资源的时空动态相对照, 确立生态需水的管理对策与战略, 这将是生态水文学在水资源和水环境管理中应用的关键所在。

5.3 流域生态水文过程对地表水水质分异的影响

在点源污染得到有效控制后,非点源污染已成为水域管理的关键。流域生态水文过程直接制约着非点源污染物在流域内的迁移转化,危及到流域地表水水质安全。在景观转移及质量变化、流域水文情势分异的基础上揭示生态水文过程对地表水水质调控机理,对流域生态水文过程进行合理的调控,是实现流域水质安全的关键所在。

5.4 流域生态水文过程与水的生态空间变化

作为一种实体,水应该有其发生迁移转化的场所和介质,对地表水来说,就是河流、湖库、湿地/洪泛平原等等,对于地下水来说就是土壤空隙、含水层等等,另外,大气环境和生物组织也是水体的主要储存场所和转移介质,这些就构成了广义上的水生态空间。然而,地表水资源主要受制于河流、湖库、坑塘、湿地(包括洪泛平原)等,在现实中,高强度的人类活动改变了下垫面的这种储水的场所或机制,人水争地的矛盾严重,使得流域内的水空间遭到破坏。在生态水文学的未来研究领域,要在对流域生态水文过程进行综合研究的基础上,确立合理的水生态空间^[4,13]。

5.5 近海陆域生态水文过程与近海水质调控

近海陆域污染物进入到近海海水中的天然屏障,其迁移转化受到近海陆域生态水文过程的调节。在海陆一体化的研究趋势下,要充分考虑近海海域生态水文过程对污染物的调节作用,增强近海陆域生态水文过程的缓冲与屏障能力,为近海水质调控提供一个新的视角,也将成为生态水文学在海洋环境管理研究中的重要内容^[14]。

5.6 基于现代地理信息系统的生态水文模型研究

从生态水文过程耦合发生的角度,建立生态水文模拟模型将是生态水文学在水环境管理中应用的升华。现代地理信息系统提供了便捷的生态水文参数获取与分析技术,未来生态水文模型研究必将以此为依托。要充分发挥生态水文模型与现代信息技术的“套嵌”技术,使得模型的实用性和灵活性增强。

5.7 基于水环境安全的生态水文决策与管理

在集成分析生态水文过程对水环境安全各要素分析的基础上,以现代地理信息系统为依托,从生态水文学的角度进行水环境安全调控的生态水文决策和管理研究。

参考文献:

- [1] IHP Bureau. Report On The Status Of Preparation Of The IHP-VI Draft Plan, Item 8 Of The Provisional Agenda (IHP/ Ic-Xiv/ 11) [R]. Unesco: Paris, 2000.
- [2] Zalewski M, Janauer G A, Jolankaj G. Ecohydrology. A new paradigm for the sustainable use of aquatic resource[A]. In: Conceptual Background, Working Hypothesis. Rational and Scientific Guidelines for the Implementation of IHP-V Project 2.3.2.4, Technical Document in Hydrology[C]. Paris:UNESCO, 1997. 55 - 80.
- [3] Georg A Janauer. Ecohydrology: fusing concepts and scales[J]. Ecological Engineering, 2000(16):9 - 16.
- [4] 严登华. 东辽河流域生态水文格局与水环境安全调控[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2003.
- [5] Baird A J, Wilby R L. Eco-hydrology: Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments[M]. London and New York: Routledge, 1999.
- [6] Zalewski M, McClain M. Ecohydrology, A list of Scientific Activities of IHP-V Projects 2.3/2.4[M]. Technical Documents in Hydrology, No. 21, Paris: UNESCO, 1998. 1 - 2.
- [7] Eric Tabacchi, Luc Lambs, H  le Guilloy, et al. Impacts of riparian vegetation on hydrological processes[J]. Hydrol Process, 2000(14): 2959 - 2976.
- [8] 翟金良. 河流洪泛区环境系统研究——以霍林河为例[D]. 北京:中国科学院研究生院/中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2002. 50 - 85.
- [9] Hillbricht-Ilkowska A, Rybak J, Rzepecki M. Ecohydrological research of lake watershed relations in diversified landscape (Masurian Lakeland,

- Poland) [J]. *Ecological Engineering*, 2000(16) :91 - 98.
- [10] 李晓兵. 国际土地利用/土地覆被变化的环境影响研究[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(4) :395 - 400.
- [11] Simulator for process of landscapes: surface/ subsurface hydrology[EB/OL]. <http://seilleta.unm.edu/research/local/water>.
- [12] 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型的若干研究进展[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(4) :341 - 348.
- [13] 严登华, 何岩, 邓伟. 水资源地域耦合空间结构初探[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2001, 32(4) :82 - 87.
- [14] 严登华, 何岩, 王浩, 等. 辽宁近岸海域水质演化及对近海陆域生态水文格局的响应[J]. *海洋通报*, 2004, 23(3) :54 - 60.

Review of effect of the ecohydrological process on water environment^{*}

YAN Deng-hua¹, HE Yan², WANG Hao¹, QIN Da-yong¹, WANG Jian-hua¹

(1. *Water Resource Department of China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100044, China;*

2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

Abstract : The domestic and foreign current research on the effect of ecohydrological process on water environment includes following topics, namely the development of the ecohydrological process, the ecological water requirement based on the ecohydrological patterns, the effects of ecohydrological process on the hydrology, water quality and water ecology, and the relative theory, methods and models. However, these researches can't reveal the ecohydrological process mechanism; furthermore, the studies on the ecohydrology are even weaker. The future topics on the function of ecohydrological on the water environment security regulation are as follows: the mechanism of development and driving force of ecohydrological; secondly, the spatial and temporal difference of ecological water requirement based on the ecohydrological process; the response mechanism of water quality to the ecohydrological process in a basin; the function of ecohydrological process on the ecological water storage; the regulation on the ecohydrological process in land region near sea for the sea water quality security; the ecohydrological model based on modern geographical information system techniques; and the ecohydrological decision and management based on the water environment security.

Key words : ecohydrological process; water environment security; review

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (G1999043602).