



水科学进展  
*Advances in Water Science*  
ISSN 1001-6791, CN 32-1309/P

## 《水科学进展》网络首发论文

题目：生态水文学：生态需水及其与流速因素的相互作用  
作者：刘昌明，门宝辉，赵长森  
收稿日期：2020-05-01  
网络首发日期：2020-06-12  
引用格式：刘昌明，门宝辉，赵长森. 生态水文学：生态需水及其与流速因素的相互作用. 水科学进展.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200612.0838.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 生态水文学：生态需水及其与流速因素的相互作用

刘昌明<sup>1,2</sup>，门宝辉<sup>3</sup>，赵长森<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院，北京 100875；2. 中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101；3. 华北电力大学水利与水电工程学院，北京 102206)

**摘要：**本文研究涉及生态水文学中的生态需水问题一般认知。探讨了生态系统动态变化与水流驱动力因素之间的关系，重点探讨水流驱动素中的关键指标——流速，通过分析流速与生态系统相互作用，从生态水文学动力因素出发估算生态需水；基于生态流速和水力半径，提出了考虑河道内生态需水与水力因素关系的“生态水力半径法”，充分利用水生生物信息(鱼类产卵洄游流速)与河道信息(包括水位、流速、糙率等)，估算河道内生态需水；归纳“生态水力半径法”在生态需水计算中的初步应用；考虑污染物降解耦合水量水质的生态需水计算、考虑鱼类等生物对流速要求的生态需水计算、考虑河道冲淤平衡的输沙需水量计算等方面。本文提出的生态流速研究既包括生物生长发育适宜的流速，又包括流速大小变化所涉及的许多动力因素，如生态地貌学或河相因素，旨在延伸与扩展生态水文学的内涵与应用。

**关键词：**生态水文学；生态需水；生态水力半径法；生态流速

**中图分类号：**P33      **文献标志码：**A

生态系统一般研究生物与环境之间的关系和生物与生物之间的关系。生态系统包括了生命体和非生命的物质与能量交换，即生命系统和生命支持系统<sup>[1]</sup>，包括了光热、水土、空气等多种要素。生态水文学研究水与生物关系，研究生态系统与水文的关系，其重大宏观意义在于：水是生命之源、生产之要、生态之基。作为非生命物质和生命物质提供给人类的服务功能不可或缺，贯穿地球各个圈层的水循环导致生物地球化学等过程发生变化。生态系统发生动态演变，水在生态系统维护与退化治理中起着重要作用，关键就在于良性水循环治理，事关生态环境的可持续性。人类活动影响着水文循环和水资源的变化，对生态系统退化与服务功能下降的影响极其明显。水与生态系统的关系与相互作用具有多样性、连锁性。

当今人类世(最近 1000 年)，全球变化规模与速度与日俱增，其巨大的影响急剧增加。研究保护生态的核心问题是人类与自然的相互作用与关系，认知人类与自然和谐；研究生态水和生态水文的宗旨是人与水的和谐，实现人类的可持续发展。在一定的意义上讲，人类生活与生产(人居)活动的空间应是人居环境。显然在人类之前，原来无生活生产等活动(无人区)的大自然也就是原生态。在这种情况下，生物与环境的关系处于天然(原生)状态，似乎可以认为原生态就是大自然，这还有待进一步商榷。研究生态水文以及水与生物的众多问题，其涵义似乎是人类与自然的相互作用与关系问题，尊重自然的核心在于保护生态。

## 1 生态水文学研究的国内外动向

国内生态水文学研究萌芽于 20 世纪末，1980 年代迅速发展至今<sup>[2-3]</sup>，生态水文研究取得明显进展。2007 年党的十七大首次把建设生态文明写入党的报告，2018 年 3 月 11 日，十三届全国人大一次会议第三次全体会议投票表决，将“生态文明”写入宪法，生态水文研究成为水科学研究新的热点。当前，中国开展生态文明建设，保护生态，绿色发展，并在建设海绵城市中强调了利用自然力，内含了人类与自然和谐的道理。

国际研究方面，1972 年在爱尔兰的首都都柏林召开的国际水与环境大会，正式提出了生态水文学的研究领域，随后各国学者开始注意水与生态关系的研究。1998 年时至国际水文计划的第 V 期(1996—2001 年)，

收稿日期：2020-05-01；网络出版日期：

网络出版地址：

基金项目：国家自然科学基金资助项目(41330529)

作者简介：刘昌明(1934—)，男，湖南汨罗人，中国科学院院士，主要从事水文水资源方面研究。E-mail: liucm@igsrr.ac.cn

作为著名的世界级老牌研究机构的英国水文研究所更名为“英国国家生态与水文中心（CEH, The Centre for Ecology & Hydrology）”，这一事件对生态水文研究的发展来说，具有里程碑意义，代表了生态水文学成为新世纪兴起的新兴学科。新世纪以来，联合国国际水文计划实施完成的3期，即HPVI-2002-2007、IHP-VII:2008-2013、IHP-VIII, 2014—2019，大力推进了生态水文研究的理论与示范。虽然IHP第八阶段的主题定为“水安全：局部、区域和全球挑战的应对”，但在水安全的定义中强调：维持生态系统需求的能力。波兰的Maciej与英国的Baird和Wilby等发表了重要的论文专著<sup>[4]</sup>，进一步推动了有关生态水文学的研究。

## 2 生态水文研究问题的若干商榷

### 2.1 生态水文研究主要术语的定性描述

生态水文学是发展中新兴学科。广泛采用的许多术语还没有统一的认识。追踪水循环过程的研究，我们仅提出以下主要术语的定性描述<sup>[5-6]</sup>，作为商榷。

(1) 生态用水 现状和未来特定目标下，维系给定生态环境功能的实际发生的用水（引水和提水）量。

(2) 生态需水 在现状和未来特定目标下，维系给定生态、环境功能所需的水量。

(3) 生态耗水 对水资源而言，是在维系现状和未来特定目标生态功能用水过程中散失的水量。

(4) 蓝水-绿水及其转化。蓝水是液/固态水，雨雪、地表与地下水及土壤水受重力及其水平分力驱动的水；绿水呈分子态于大气与土壤中，受分子力、热力作用。绿水主要是由蓝水转化而来的汽态水，蓝水-绿水转化过程所遵循的基本物理定律是质量守恒；前者包括河湖、海洋中的液态水，密切关系到水生生物用水，后者则包括陆生生态系统及其用水，如林草、湿地陆生动物的用水等等。

(5) 生态需水量水质标准。不危害水生态系统健康发育所给定的水质类型。

(6) 生态供水与补水 提供维系现状和未来特定目标生态功能的降水性和径流性（包括地下径流与土壤水）的水量与补充水量。

(7) 最小生态需水量。“三生（生活、生产与生态）”用水竞争条件下，保护生态系统服务基本功能的需水阈值，或者说，生态用水量是维系给定生态系统环境功能的一种必要水量或最小阈值。

(8) 生态基流，是由稳定地下水源补给河流的基本流量，保持枯水期或无雨时河道的水流，用于维持水生生物生存与水道及岸带的生境。

(9) 最大流量与生态洪水 指靠汛期河流泛滥繁衍的河岸与洪泛区的生态系统用水以冲刷河床的挟沙水量。包括调水调沙、人造洪峰，维持水道健康，可谓之“生态洪水”。

(10) 生态系统的总用水量 主要包括生态系统耗散水量、生态系统蓄水量与生态系统退水量。

(11) 生态耗散水量、生态蓄水量与生态退水量关系。基于水循环水平衡方程，生态水蓄变量等于生态用水量减生态耗散水量和生态退水量，既要“盘活存量”，又要“用好增量”。

显然，以上列出的一些常用术语并不完全，还有不少疏漏，可以补充。在2017年IHP发布的重要技术文件中提出：生态水文学是“由分子尺度到流域尺度的整体科学”，而河流生态系统是“由水文过程调控的超有机体”等，这些新的定义也尚待认知与商榷。

### 2.2 生态水文动力因素研究的认知

作为生态水文学动力因素的流速，贯穿在生态水文学分子到流域尺度的研究中，是“由水文过程调控的超有机体”的核心要素。生态需水是生态水文学研究的核心方向之一，现行方法大多根据需水量多少展开计算、鲜有从生态水文学动力因素出发估算生态需水，从生态系统动态与水生态流速因素相互作用关系研究来看是不足的。为此，2000年以后，我们围绕生态水文动力因素展开了研究，提出了考虑河道内生态需水与水力因素关系的“生态水力半径法”。生态水的流速广泛涉及生态、环境过程的方方面面，例如大宁河三峡湾区流速与藻类生长关系的研究等等，不胜枚举。以河道整治水沙关系为例：对于大颗粒推移质，根据艾里定律“泥沙颗粒的形状为一个边长为 $d$ 的立方体，正面推力 $P_x$ 与泥沙压力面 $d^2$ 及流速水头（流体中单位重量液体所具有的动能） $v^2/(2g)$ 成正比”，推移质的重量（ $W$ ）与水流速度（ $v$ ）的6次方成正比，即有 $W = d^3\rho_s = Av^6$ ，这可以解释流域坡面流速的变化导致的泥沙变化呈高次方非线性关系；对于河道悬移质，其含

沙量与流量的比值来表征河流来水来沙关系的指标<sup>[7]</sup>, 即有  $S_w=S/Q$ ,  $S$  为悬移质含沙量,  $Q$  为流量,  $S_w$  为来沙系数。流量是流速与过水断面的乘积, 也反映  $S_w$  与水动力因素流速是高次方非线性关系, 有关河流泥沙与流速的复杂关系详见文献[8]。

以上说明非常粗略, 除此之外, 在水生态、环境的需水研究中常用到多维水质模型, 里面均含流速因素, 在水与生物的关系中也涉及鱼类洄游, 洄游需要适宜流速, 例如: 鲃鱼的感觉流速、喜爱流速与极限流速<sup>[9]</sup> 分别是 0.1、0.2~0.3、0.4~0.5 m<sup>3</sup>/s 等等, 限于篇幅不予累述。

### 3 维持生态系统动态的流速因素计算与应用

#### 3.1 生态流速概念及计算方法

##### 3.1.1 生态流速

生态流速是针对不同的水生态保护目标而提出的, 根据河流的生态服务功能不同, 其河流生态保护目标也各有差异, 要保持河流生态系统的基本功能, 就要满足其食物链和食物网的健康, 而其食物链顶端鱼类对流速的要求是否能够满足成为关键的因素, 鱼类栖息地的生态流速, 应该是满足鱼类不同生育期、以及不同鱼类对流速的需求, 包括鱼类的感觉流速、喜爱流速和极限流速等<sup>[9]</sup>; 对于多沙河流, 要保持河道内的水沙平衡, 要维持河流本身的输运功能, 其生态流速就是满足河流输沙的不冲不淤流速; 对于受人类活动干扰的河流, 比如城市河流, 人类的废污水未经达标处理直接排入河道, 其生态流速即为满足“流水不腐”的自净流速; 按地带和较大尺度的区域、流域, 生态系统各有自然禀赋的特性, 生态需水各不相同, 特别是河流入海的海陆交错带情况复杂, 研究困难包括维持河口与三角洲生态系统的水盐平衡, 防止河口地区的盐渍化和荒漠化, 其中需要研究保持适宜入海水量的流速。

生态流速一定要针对明确的水生态保护目标方能确定, 而且不是一个确定的数值, 应该是一个阈值范围。全国第一个水生态文明城市济南市 3 年春、夏、秋季 500 余站次的野外水生态调查结果表明, 流速与水深是影响水生态系统健康的关键水文因素<sup>[10]</sup>: 表征健康的生物多样性指数 (H) 和生物完整性指数 (IBI) 随流速 ( $v$ )、水深 ( $h$ ) 数值增大而增加, 且有明显的拐点出现, 阈值范围如图 1 所示。这说明流速、水深在生态需水计算中需要重点考虑。

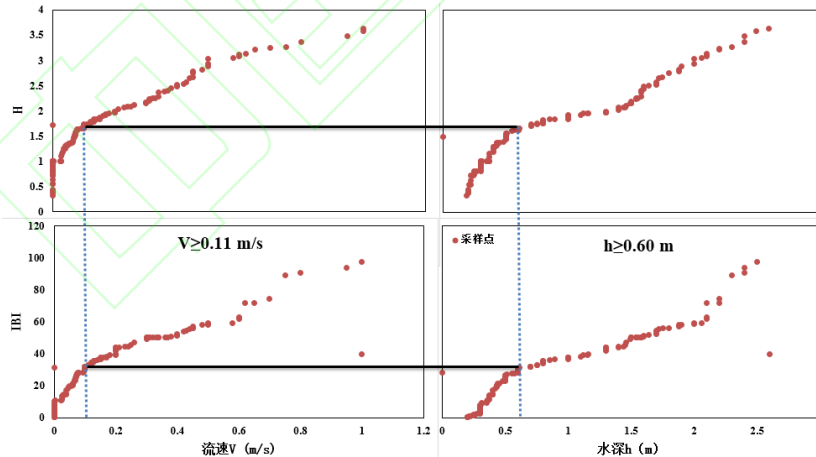


图 1 济南市流速/水深与生态系统健康指标 (多样性指数 H 与生物完整性指数 IBI) 的关系<sup>[9]</sup>

Fig.1 Relationship between flow velocity / water depth and indices of ecosystem health (biodiversity (H) and Integrated Biological Index (IBI))

##### 3.1.2 无资料地区河流地形与流速估算

河流地形是生态需水计算的基础。在人迹罕至的缺资料地区由于地面水文站网稀少导致河流地形、水文、生态资料缺乏, 传统流量测验与生态需水估算方法难以推广应用, 迫切需要进行现场勘测引入新手段获取地形、流速等基础数据, 估算流域生态需水。无人机、卫星等遥感技术的发展为缺资料区水文资料的获取提供了新的手段, 充分利用遥感技术测量河流地形<sup>[10]</sup>与流速<sup>[11]</sup>、构建缺资料区生态需水的计算方法是破解



这些地区水文资料缺乏、生态需水估算难题的有效途径。

为实现这一目标，可基于无人机等遥感技术野外获取研究区高重叠度的影像，室内利用 Pix4D 等专业软件处理，得到高精度的数字表面模型（DSM）、正射影像图（DOM）以及影像点云（图 2 左上），进一步通过滤波处理得到高精度 DEM（空间分辨率 0.02~0.05m，图 2 右上），结合流域内河道变化特征，可获得指定位置的河流大断面形状，如图 2 所示，详见文献[10]；除此之外，还可以根据陆地与水体反射率的差别，利用卫星或无人机遥感影像计算河流流速，具体可参考文献[11]。



(a) 无人机获取的影像点云

(b) 滤波处理得到 DEM

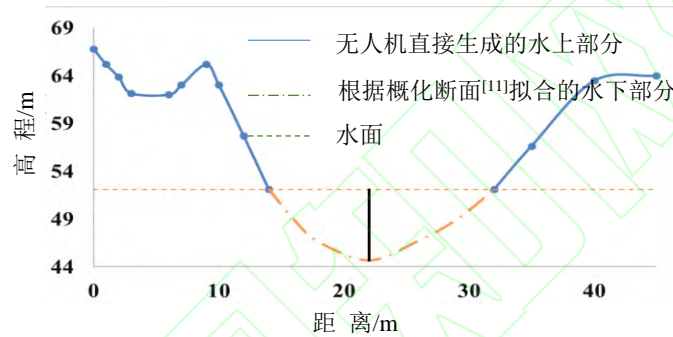


图 2 基于无人机技术的河流大断面获取

Fig.2 Cross-section produced by using UAV

在支流等水面宽度较小的河流上，可以使用无人机获取 DEM 生成河流大断面；在干流或水面宽度较大的河流上则可以使用高分三号、哨兵等高分辨率卫星获取 DEM 与河流流速，辅助计算流域内河流生态需水。该方法在全国第一个水生态文明建设试点城市济南（全市只有 2 个水文站）的应用表明，所采用的基于无人机和地面监测相结合的生态需水计算方法可以快速、高效地计算流域生态需水，有效支撑了水生态文明建设试点城市的建设与评估。

### 3.1.3 生态水力半径法

生态水力半径是基于生态流速、由水力半径衍生出来的一个概念，水力半径是水力学中非常重要的一个参数，是河道过水断面面积与湿周的比值，对于宽浅型河道，水力半径的数值与平均水深较为接近。通过河道的糙率和水力坡度及一定水生态维护目标的生态流速即可确定其过水断面的生态水力半径<sup>[12]</sup>，由生态水力半径所确定的过水断面流量即为满足其水生态维护目标的生态流量。

生态水力半径法认为河道信息（包括水力半径、糙率和水力坡度）和所需的流速，是维护某些生态功能所必需的。该方法充分利用水生生物信息（鱼类产卵洄游流速）和河道信息（包括水位、流速、糙率等），估算河道内生态需水量。方法计算结果不仅能满足鱼类产卵洄游的流速要求，还可应用于其它生态问题的生态流（如水沙平衡、污染自净等）。该方法不仅适用于分析水生系统，如鱼类栖息地，还可用于确定输沙水流速度、需水量等。该方法先由明渠均匀流公式推导出水力半径与河道的糙率  $n$ 、流速  $v$ 、以及水力坡度  $J$  之间的关系见式(1)<sup>[12]</sup>，在此基础上进一步计算生态需水 ( $Q_E$ ) 见式(2)<sup>[13]</sup>。

$$R = n^{3/2} \cdot v^{3/2} \cdot J^{-3/4} \quad (1)$$

$$Q_E = \frac{1}{n} R_E^{\frac{2}{3}} A_E J^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中： $R_E$ 为生态水力半径，其它符号详见文献[12-13]。其中糙率和水力坡度是河流本身的水力学信息（即河道信息）。

对于抛物线形过水断面（图3），可以通过测定河流不同水面宽对应的水深即可推导出相应的水力半径。

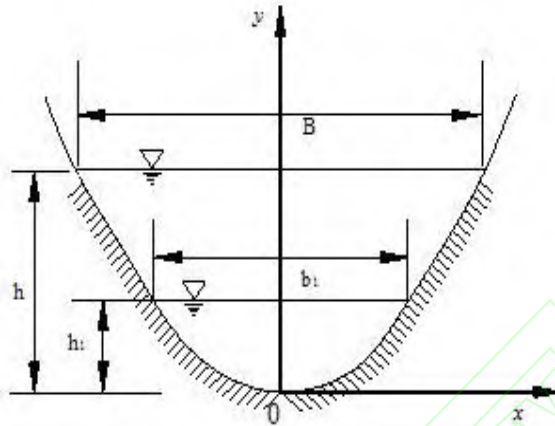


图3 抛物线形过水断面

Fig.3 Parabola shaped watercourse cross-section

概化近似成抛物线形过水断面的水力半径见式(3)<sup>[12]</sup>。

$$R = \frac{B \cdot h}{3 h^{1/2} \sqrt{h + \frac{b_1^2}{16}} + 0.1875 b_1^2 \ln \frac{4 h^{1/2} + 4 \sqrt{h + \frac{b_1^2}{16}}}{b_1}} \quad (3)$$

式中： $R$ 为水力半径，其他符号见图3。

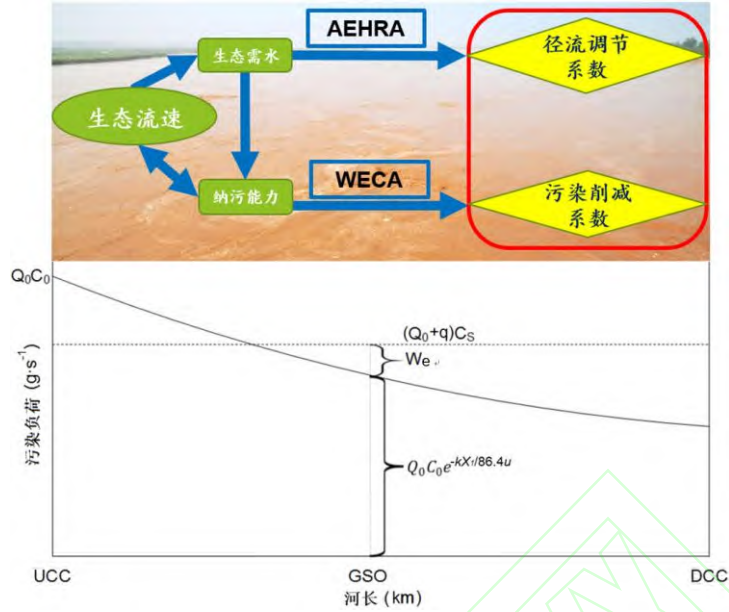
然后，将流速用含有一定水生态维护目标的生态流速来代替，此时计算的水力半径即为生态水力半径，然后由此生态水力半径推求过水断面的流量就是能够满足一定河流生态功能的生态需水量，也称为生态流量。有关生态水力半径法在南水北调西线调水河流下游的河道内基本生态需水量的应用详见文献[12-13]。

生态水力半径法目前在河流基本生态需水<sup>[12]</sup>、考虑污染物降解耦合水量水质的生态需水<sup>[14]</sup>、考虑鱼类等生物对流速要求的生态需水<sup>[15-19]</sup>、考虑河道冲淤平衡的输沙需水<sup>[20]</sup>等方面进行了初步应用，取得了较好的效果。该方法的核心思想是用生态流速和生态水力半径来确定一定水生态保护目标的生态需水量（也可表示为生态流量），如何确定生态流速是重中之重。

### 3.2 生态水力半径法应用

#### 3.2.1 考虑污染物降解耦合水量水质的生态需水计算

削减排污减少污染入河、提高污染物降解系数是治污的重点。水生态系统中水生物的生存既取决于水量，又取决于水质，强烈的人类活动导致污水入河量增加、河流水质退化，对水生态系统健康产生了难以消除的负面影响。为恢复水生态健康，亟需深入分析污染物的降解过程，既考虑水生态对水量的需求，又考虑其对水质的要求，水量水质耦合计算生态需水。“流水不腐户枢不蠹”，生态需水计算既要考虑社会经济发展、满足排污需求，又要考虑河流的纳污能力和水生态中关键生物的耐受能力，把我国环境功能分区概念与水体关键生物对污染物的耐受能力结合在一起，构建既满足社会经济排污需要，又不超出关键生物耐受能力的生态需水计算方法，如图4所示。



(图中, AEHRA 表示生态水力半径法; WECA 表示环境功能区纳污能力; UCC、GSO、DCC 分别代表上游控制断面、概化的河段集中排污口、下游控制断面;  $W_e$  表示河段的纳污能力;  $C_s$  代表水质标准中的污染物允许浓度;  $u$  代表河流平均流速)

图 4 考虑污染物降解、耦合水量水质的生态需水计算

Fig.4 E-flows with consideration of pollutant degradation

首先, 把河段面源、点源概化到某一概化的排污口, 概化排污口 (GSO) 到下游控制断面 (DCC) 的距离根据式(4)计算。

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i C_i e^{-x_i} x_i}{\sum_{i=1}^n Q_i C_i e^{-x_i}} \quad (4)$$

式中:  $L$  为概化的排污口与下游断面的距离;  $i$  代表第  $i$  个排污口或支流;  $Q_i$ 、 $C_i$  分别表示第  $i$  个排污口的污水流量与污染物浓度;  $x_i$  表示第  $i$  个污水口距离下游控制断面的距离。

其次, 计算生态需水水量 ( $Q_E$ , 式 (2)) 及径流调节系数 ( $\alpha_c$ ), 满足鱼类水量、水质需求, 详见式 (5)。

$$\alpha_c = \frac{Q_E}{Q_0} \quad (5)$$

式中:  $Q_0$  为上游来水量。

最后, 耦合社会经济与鱼类对水质的需求, 计算纳污能力 ( $W_e$ ) 和污染物削减系数 ( $\beta_c$ ), 方便削减排污、控制污染物入河总量, 见式 (6) — (8)。

$$W_e = (Q_0 + q)C_s - Q_0C_0e^{-\frac{kx_1}{86.4u}} \quad (6)$$

$$W_a = \sum_{i=1}^n q_i c_i e^{-\frac{k(x_i-x)}{86.4u}} \quad (7)$$

$$\beta_c = \frac{W_a}{W} \quad (8)$$

计算污染物削减系数, 方便削减入河污染物负荷  $W_a$ 、或增加流速提高污染物降解系数增加纳污能力  $W_e$ , 严格控制河流污染物负荷  $W_a$  不超出纳污能力  $W_e$ , 详见文献[13]。

该方法在渭河流域的应用说明, 把水环境功能区与鱼类的耐受能力结合在一起, 同时考虑水量水质, 能实现水生态与社会经济双赢。研究提出的流量调节和污染物控制两个系数简单易用, 可方便基层河流管理人员调度水量、控源截污, 保障河流生物对水量、水质的需求, 有效降低城市、农业、矿业排污和水资源不合理开发对水生态产生的负面影响, 逐步消灭黑臭水体、修复受损的水生态系统, 有效维持、逐步恢复水生态系统的健康, 助力黄河流域高质量发展。



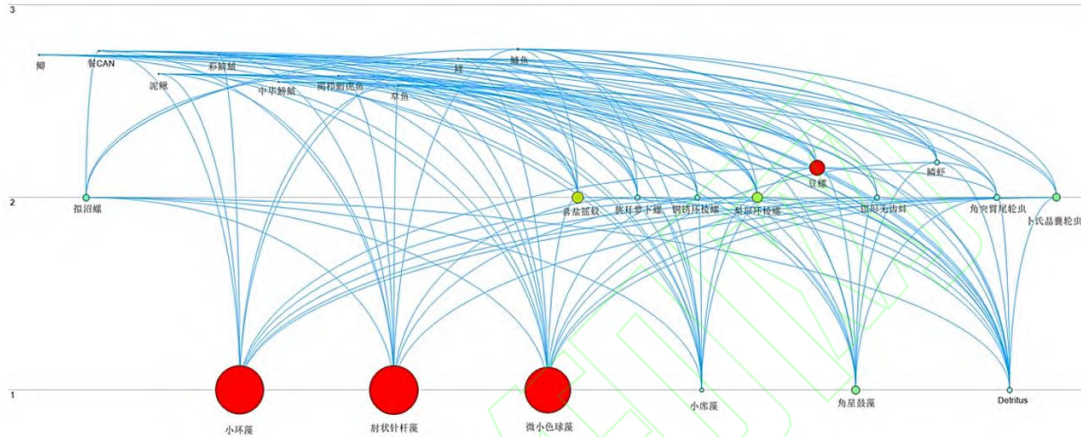
### 3.2.2 考虑鱼类等生物对流速要求的生态需水计算

剧烈的人类活动，对河道内的天然水生态造成了前所未有的负面影响，致使许多河段水生态退化甚至恶化，迫切需要围绕鱼类等水生态关键物种的需求，提出适宜的生态需水计算方法，有效的维护和恢复水生态的健康。

生态需水计算时首先需要围绕鱼类等水生物需求，利用优势度<sup>[9,17]</sup>（式（9））或食物网<sup>[17]</sup>（图5）模型筛选水生态关键物种，与国家、地方珍稀或濒危物种耦合，确定水生态维护目标。

$$I_{mprotance,i} = \omega_1 P_{a,i} + \omega_2 P_{b,i} \quad (9)$$

式中： $I_{mprotance}$  表示物种优势度； $P_a$  和  $P_b$  分别代表物种的密度、生物量占生物群落全部密度、生物量的比例； $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 是密度和生物量的权重， $\omega_1 + \omega_2 = 1.0$ ，详见文献[9]。



（连线表示物种之间的捕食与被捕食关系；圆圈大小表示物种生物量大小；左侧1、2、3表示营养等级，等级越多表示食物网越复杂，水生态越健康）

图5 水生态食物网重构

Fig.5 Food-web of an aquatic ecosystem

研究水与生态系统的关系，分析水生态维护目标对水的动力过程的需求，利用生境适宜性模型<sup>[15,18]</sup>（式（10））水生态维护目标（关键鱼类）的适宜流速与适宜水深。

$$MHSI_k = \sum_{i=1}^I \frac{p_{ki}}{I} \quad \text{with } p_{ki} = \frac{n_{ki}}{N_i A_k} \quad (10)$$

式中： $MHSI_k$  是多个物种沿某一资源轴（比如流速、水深）的生境适宜性指数； $k$  代表某一资源轴上的梯度； $n_{ki}$  代表物种在资源轴某梯度上的密度； $A_k$  代表可用栖息地的比例，详见文献[17]。

最后，利用计算得到的适宜流速与适宜水深与式（2）可计算满足水生态维护目标需求的最小和最大生态需水（ $Q_E$ ）。不仅要计算生态需水年总量，在资料条件好、水生态维护目标重要的地区还要计算生态需水月过程甚至日过程。为方便水利工程调度需要，需同时计算生态流量与生态水深，作为闸坝生态调度的参考；若考虑在资料稀缺地区应用，则需要针对资料稀缺程度，确定能维护水生态健康的最基本的水生态维护物种，充分利用遥感卫星、无人机等先进手段<sup>[9]</sup>获取基础数据，借用全球水生态研究成果，确定水生态维护物种对水动力的需求，估算生态需水。

该方法考虑了生态系统对不同季节、不同河段流速和水深的要求，与3种全球广泛应用的方法 Tennant、湿周法、R2-CROSS 等进行了比较，表明该方法在闸坝众多的河流上的应用更实用、可靠；应用到我国闸坝分布最多、但水文生态资料难支撑传统方法的淮河流域，定量分解了闸坝和排污对下游水生态的影响，完成了生态需水定量评估及调配，提高了淮河流域的水资源管理调度水平，增强了当地社会经济的可持续水平。

### 3.2.3 考虑河道冲淤平衡的输沙需水计算

首先确定输沙需水量的生态流速。保持河流的纵向连通性关键就是要保持河流的水沙协调，维持冲淤平衡，因此输沙需水量的生态流速就是不使河流遭受冲刷又不使河流发生淤积的流速，这一流速就是水力学中的允许流速，允许流速大于不淤流速而小于不冲流速，一般表示为



$$v_{\min} < v_c < v_{\max} \quad (11)$$

式中： $v_c$ 为允许流速， $v_{\min}$ 为不淤流速， $v_{\max}$ 为不冲流速。

$v_{\max}$ 的数值取决于河床的土质状况，包括河床的土壤种类、颗粒大小级配及密实程度，以及河道是否有衬砌和河道内的实际流速等因素。

$v_{\min}$ 的数值一般根据河流中含沙量、含砂粒径以及水深等因素来确定，有如下的经验公式

$$v_{\min} = \beta h_0^{0.64} \quad (12)$$

式中： $h_0$ 为天然河流的平均水深； $\beta$ 为淤积系数，淤积系数与水流挟沙情况有关，当河流的水流挟带粗砂时， $\beta=0.60\sim0.70$ ，挟带中砂时， $\beta=0.54\sim0.57$ ，挟带细砂时， $\beta=0.39\sim0.41$ 。

因为允许流速处于不冲和不淤流速之间，所以，满足河流输沙需水量的生态流速取定不淤流速的上限值，即

$$v_c = \max\{v_{\min i}\} \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (13)$$

其次计算输沙需水量的生态水力半径。由上面确定的输沙需水量的生态流速，以及河流的糙率  $n$  和水力坡度  $J$  再根据式(1)即可确定满足河流输沙要求的输沙生态水力半径。

由上可知，利用生态水力半径法计算河道内输沙需水量的关键是确定输沙需水量的生态流速，即满足河流不冲不淤的允许流速，然后通过计算确定的输沙生态水力半径即可核算出满足河流冲淤平衡的输沙生态需水量，关于生态水力半径法计算河道内输沙需水量的应用请参阅文献[20]。

## 4 结论与展望

(1) 生态水文学是水文学与生态学交叉研究的领域，起始于上世纪后期的新兴发展学科。世界各国经历了半个世纪的理论与实践研究的快速发展，已经取得了大量的成果，但方兴未艾，作为成熟的学科理论与技术还任重道远，中国实行生态文明建设方针的实现将对水与生态环境的相关研究提出新的挑战。

(2) 生态水文学尚无确切而统一的定义，一般说是研究生物与水或水与生物之间的相互关系。近年 UNESCO-IHP-VIII 发布的文件提出生态水文学为：“从分子到流域尺度的整体科学”，并称河流生态系统是“由水文过程调控的超有机体”。可以看到大量的有关生态水文研究的新名词层出不穷，有的甚至让人费解，生态水文学研究在探索中不断发展。

(3) 生态水文学研究归结为研究水文与生物间的关系，是一个很大的研究领域。本文针对陆、水两域生态系统动态变化与水驱动力因素的关系进行了探讨，聚焦于对流速的考虑，正如古语“流水不腐”，提出生态流速的研究既包括其与生物生长发育的适宜流速，又包括流速大小变化所涉及的动力因素，包括生态地貌学或河相因素。

(4) 中国是最大的发展中国家，发展仍然是当今的第一要务。对水资源要坚持“在保护中发展和在发展中保护”。生态环境保护与社会经济发展是一对矛盾，具有统一性，保护与发展可以兼顾。习主席“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”十六字新时期治水方针已为我们指明了方向，必须严格遵照。坚持资源节约和生态环境保护的基本国策，坚持生态优先，绿色发展，需要把生态水文学的研究作为新世纪水科学发展的主流。

(5) 全球气候变化与人类活动变化对生态、环境的影响也是生态水/水生态研究的一个重大难题。包括对水文要素的初阶（直接）和高阶（连锁）两种影响。如何予以划分与求解是我们面临的挑战。

展望未来，生态水文学创新，可望通过多学科交叉、超前研究和实验原创等三个途径来实现，包涵巨大的创新空间。本文作者所述的研究与应用重点考虑了水文要素中的流速，尚未涉及其更多的要素（如水深、水温、水化学等等）与生物的关系，均待扩展。本文研讨涉及的也会有所疏漏，不足之处敬请读者批评指正。致谢：在本文的编写中，承蒙张建云院士、刘晓燕副总工与王煜局长的指导帮助。

### 参考文献：

- [1] 董哲仁. 探索生态水利工程学[J]. 中国工程科学, 2007, 9(1): 1-7. (DONG Z R. Exploring eco-hydraulic engineering[J]. Engineering Science, 2007, 9(1): 1-7. (in Chinese))

- [2] 夏军, 左其亭, 韩春辉. 生态水文学学科体系及学科发展战略[J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 665-674. (XIA J, ZUO Q T, HAN C H. Disciplinary system and development strategy for Eco-hydrology[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 665-674. (in Chinese))
- [3] 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. (YAN D H, HE Y, DENG W, et al. *Advances in the Ecohydrology research*[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(5): 467-473. (in Chinese))
- [4] MACIEJ Z, BAIRD A J, WILBY R I, et al. *Ecohydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments*[M]. London: Routledge, 1998: 346-373.
- [5] 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 626-633. (ZHENG H X, LIU C M, FENG H L. On concepts of ecological water demand[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(5): 626-633. (in Chinese))
- [6] 柳长顺, 陈献, 刘昌明, 等. 流域生态用水与需水研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(6):17-21. (LIU C S, CHEN X, LIU C M, et al. Study on eco-environmental water use and demand of river basin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2005, 36(6):17-21. (in Chinese))
- [7] 吴保生, 申冠卿. 来沙系数物理意义的探讨[J]. 人民黄河, 2009, 30(4): 15-16. (WU B S, SHEN G Q. Discussion on the physical meaning of incoming sediments coefficient[J]. *Yellow River*, 2009, 30(4): 15-16. (in Chinese))
- [8] 刘晓燕. 黄河近年水沙锐减成因[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (LIU X Y. *The Cause of Yellow River water and sand reduction*[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [9] 李梅. 不完备信息下的河流健康风险预估模型研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (LI M. *Study on river health risk prediction model with incomplete information*[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [10] ZHAO C S, ZHANG C B, YANG S T, et al. Calculating e-flow using UAV and ground monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 351-365.
- [11] TARPANELLI A, BROCCA L, LACAVA T, et al. Toward the estimation of river discharge variations using MODIS data in ungauged basins[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136, 47-55.
- [12] LIU C M, MEN B H. An ecological hydraulic radius approach to estimate the instream ecological water requirement[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(3): 320-327.
- [13] 门宝辉, 刘昌明. 河道内生态需水量计算生态水力半径模型及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (MEN B H, LIU C M. Ecological hydraulic radius model and its application to assessment of instream flow requirements [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))
- [14] ZHAO C S, YANG S T, LIU J G, et al. Linking fish tolerance to water quality criteria for the assessment of environmental flows: a practical method for streamflow regulation and pollution control[J]. *Water Research*, 2018, 141: 96-108.
- [15] LIU C M, ZHAO C S, XIA J, et al An instream ecological flow method for data-scarce regulated rivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 398: 17-25.
- [16] ZHAO C S, YANG S T, ZHANG H T, et al. Coupling habitat suitability and ecosystem health with AEHRA to estimate e-flows under intensive human activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 470-483.
- [17] ZHAO C S, YANG S T, LIU C M, et al. Linking hydrologic, physical and chemical habitat environments for the potential assessment of fish community rehabilitation in a developing city[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 384-397.
- [18] ZHAO C S, YANG Y, YANG S T, et al. Impact of spatial variations in water quality and hydrological factors on the food-web structure in urban aquatic environments[J]. *Water Research*, 2019, 153: 121-133.
- [19] ZHAO C S, YANG S T, XIANG H, et al. Hydrologic and water-quality rehabilitation of environments for suitable fish habitat[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530, 799-814.
- [20] MEN B H, LIU C M. Ecological hydraulic radius model to calculate instream flow requirements for transporting sediment in the western water transfer region[J]. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, 2009, 52(11): 3401-3405.

# Ecohydrology: environmental flow and its driving factors

LIU Changming<sup>1,2</sup>, MEN Baohui<sup>3</sup>, ZHAO Changsen<sup>1</sup>

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100101, China; 3. School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, PR China)

**Abstract:** This paper discussed the general conceptions on environmental flow (e-flow). Emphasis was laid on relationship between the dynamic change of ecosystem and factors resulted by hydrological change especially by the change of flow velocity whereby to estimate e-flows. Moreover, this paper introduced a Chinese e-flow method – Ecological Hydraulic Radius Approach (EHRA) which basis is ecological velocity and ecological hydraulic radius. EHRA estimates e-flow fully accounting for information of biota, e.g., flow velocity requirement of fish during spawning seasons, and information of rivers, such as water level, flow velocity, roughness. In addition, this paper generally described the application of EHRA in estimation of e-flow by considering pollutants degradation, requirement of fish on flow velocity, balance of river-course with erosion and sedimentation processes. What is worth noticing is that the ecological flow velocity for e-flow estimation in this paper refers to both the flow velocity suitable for biota and the flow velocity variation induced dynamic factors (e.g., ecological geomorphology, fluvial factors), which can enlarge the conception of ecohydrology and broaden its application.

**Key words:** Eco-hydrology; Environmental flow (e-flow); Ecological Hydraulic Radius Approach (EHRA); ecological flow velocity

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41330529).