

文章编号: 1004-8227(2010) 01-0098-09

水文生态学研究进展及应用前景

程 飞^{1,2}, 吴清江^{1*}, 谢松光¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 水文生态学是一门研究水文学和生态学交叉领域的新兴学科, 目的是寻求对水文因子与生态系统间结构与功能的理解, 是水资源可持续性管理的方法。自 1992 年在都柏林的国际水环境研讨会提出以来, 水文生态学很快成为国外的研究热点问题之一, 并已经取得了长足的发展。现在, 淡水资源在世界上很多地区不仅是发展的限制因素, 也是某些社会存在的限制因素。当前, 中国水环境问题十分严峻, 大坝的建设与河流生态系统保护间的矛盾日益突出; 西部生态环境脆弱, 水资源贫乏, 土地荒漠化十分严重, 解决这些问题对中国的经济和社会发展具有重要意义, 需要有对水文生态学机制的深入了解。从水文生态学的定义、研究进展、展望等方面, 系统地论述了目前水文生态学的研究进展, 并结合中国实际情况, 重点强调了河流水文生态学的进展和在中国大坝建设中的作用与意义。

关键词: 水文生态学; 进展与前景; 江河与大坝; 生态系统

文献标识码: A

水资源是人类生存与发展不可或缺的因素之一。在人类的发展历史中, 水资源一直占据着重要位置, 尤其是淡水资源。但是淡水资源不仅数量少, 仅占全球水资源的 2.5%; 而且分布非常不均, 只有 0.3% 的淡水是便于人类利用的地表淡水, 其中, 2% 分布于河流, 11% 储存在湿地, 其余大部分(87%) 分布于湖泊之中^[1]。如此少而且分布不均的淡水资源却是全球约 6% 的物种(至少 100 000 种)和人类生存的基础^[2]。

随着人类的不断发展, 人与水域生态环境间的矛盾日益突出, 污染、水利工程、渔业等行为已经成为生态系统保护的巨大威胁。Popper(1980 年)认为, 当前的技术和学科已经无法解决环境问题^[3]。面对日趋紧张的水环境, 以水资源的可持续管理、人与自然的和谐发展为目标的水文生态学应运而生, 并迅速发展(图 1)。

1 概述

1.1 Hydroecology 与 Ecohydrology

Hydroecology(水文生态学)和 Ecohydrology(生态水文学)都是研究生态学与水文学交叉领域的

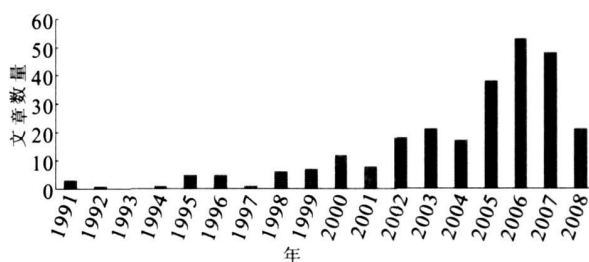


图 1 利用 Hydroecology、Hydro-ecology、Ecohydrology 和 Eco-hydrology 在 the ISI Web of Knowledge Science Citation Index Database(1991 年至 2008 年 7 月 21 日)的检索结果

Fig. 1 Result of Searching by Using Hydroecology, Hydro-ecology, Ecohydrology and Eco-hydrology in the ISI Web of Knowledge Science Citation Index Database (from 1991 to July 21st, 2008)

学科^[4], 两者在研究的侧重点和结果等方面应该有较大的差别。然而, 从已发表文献的检索结果分析, Hydroecology 和 Ecohydrology 在实际应用中相对混乱, 生态学家经常使用 Ecohydrology, 而水文学家多采用 Hydroecology^[5]。从目前的使用情况看, 指生态与水文学交叉领域研究的时候, Hydroecology 和 Ecohydrology 通常是等义的^[4]。

1.2 定义

水文生态学的定义存在相当大的争议。Wasen 等^[6]1996 年第一次提出了水文生态学的定义。

收稿日期: 2008-12-26; 修回日期: 2009-03-19

作者简介: 程 飞(1977~), 男, 湖北省黄陂人, 博士研究生, 主要研究方向为鱼类与环境生物学。E-mail: chengfei@ihb.ac.cn

* 通讯作者 E-mail: qjwu@ihb.ac.cn

他们认为: Ecohydrology 是一门应用学科, 目的是更好地理解水文因子对湿地生态系统自然发展的决定作用, 并特别强调了水文因子在湿地自然保护和恢复中的功能价值。Wassen 等的定义是针对湿地生态系统而言, 定义的研究对象非常狭隘; 而且认为水文生态学研究的是水文因子对生态系统的单向作用过程, 具有很大的片面性。Baird 等 (1999 年) 认为, Ecohydrology 是研究植物与水的相互作用和与植物生长相关的水文过程的学科^[7]。Baird 的定义扩大了生态系统范围, 而且也注意到了无机环境与有机体的相互影响, 但是 Baird 的定义也将水文因子与动物的相互作用排除在外, 但实际上这是一个重要的领域^[8~10]。以植物为中心对象的定义还有, Rodriguez-Iturbe (2000 年) 认为 Ecohydrology 是探求作为生态模式和过程基础的水文机制的学科^[11,12]。

上述定义均以植物作为定义的出发点, 没有提及动物区系在水文生态学研究中的地位, 鉴于上述定义的不足, Dunbar、Nuttle、Dolman 等人从水文因子与生物体(生态系统)的相互作用的角度, 提出了各自的定义。Dunbar 等^[13] (2001 年) 提出: Hydroecology 是水文学(水力学、地理形态学)与生物学(生态学)的综合应用, 以预测在一定的时空范围内淡水生物和生态系统对环境因子变化的响应。Nuttle^[14] (2002 年) 认为: Ecohydrology 是生态学和文学的亚学科, 重点研究水文过程对生态系统配置、结构和动态的作用, 及生物过程对水循环要素的影响。Dolman^[15] (2003 年) 认为: Ecohydrology 是寻求对水循环与陆地生态系统之间相互作用的理解。此外, Newman 等^[16] (2006 年) 认为 Ecohydrology 是寻求更加整体和全面的方式理解环境系统。

Zalewski (2000 年) 提出的 Ecohydrology 定义得到了较为广泛的认同。Zalewski^[17] 认为: Ecohydrology 是在流域尺度上研究水文学与生物区功能上的相互作用, 是水资源可持续管理的一种新方法。显然, Zalewski 定义的重点是水文因子与生物间功能关系的建立, 而不是对两者基础过程的理解^[4], 因而, Zalewski 的定义在水资源管理和生物保护等领域, 特别是需要评估生态系统对水胁迫的响应时被广泛应用。

2 研究方向与进展

水文生态学作为水资源可持续管理的模式, 研

究领域相当广阔。从文献资料可以看出, 水文生态学重点研究方向有: 河流水文生态学、“气候-土壤-植被”动态、湿地等。

2.1 河流水文生态学研究

当今, 由于日益严重的人为干扰, 河流生态系统退化已被公认是全球性的生态环境问题, 因此河流成为水文生态学研究的核心问题之一。

2.1.1 大坝的生态影响

人类活动已经越来越多地影响了河流生态系统的完整性。大坝是人类对河流控制能力的具体体现, 作为人类对河流生态系统最主要的干扰形式, 其灾难性的生态后果已经引起了广泛的关注, 成为水文生态研究的热点问题^[18]。

大坝阻断了自由迁移的通道是大坝对鱼类最直观的影响。由于大坝的建设, 原本畅通的大生境被分割成破碎的小生境, 严重影响了鱼类的生殖, 尤其是对洄游性鱼类。如大坝的存在阻断了鲑鱼的生殖洄游通道, 导致多种鲑鱼的种群数量急剧下降。国外投入了大量的人力、物力进行保护性研究^[19,20], 在重要的洄游通道上修建鱼道, 试图挽救这些受到威胁的物种, 并立法保护。大鳞大马哈鱼 (*Oncorhynchus* spp.) 原本是哥伦比亚河流域重要的捕捞鱼类, 自从该流域修建一系列水利工程后, 大坝成为大鳞大马哈鱼成鱼和仔鱼洄游难以逾越的巨大障碍, 并导致该鱼失去了 45% 的栖息地, 种群数量不断下降, 成为哥伦比亚河流域立法保护的濒危鱼类^[21]。

大坝使得鱼类生境的片段化, 阻碍了鱼类基因交流, 并对鱼类造成了进化压力。Robin 等人^[22] 对美国哥伦比亚河流域的鲑进行研究, 试图分析大坝对长途洄游鱼类的进化压力, 研究表明大坝很可能带来进化上的严重后果。大坝形成局部更适宜于定居性的生境, 增加了洄游的难度, 以牺牲鲑鱼的迁移为代价, 减少了用于性选择的能量投入, 因此大坝很可能使鲑鱼朝定居性生活进化。

大坝严重影响了产漂流性卵鱼类的资源补充。产漂流性卵鱼类在全球广泛分布, 是许多河流中的重要经济鱼类^[23]。大坝造成河流径流的改变和生境片段化缩短了卵、仔鱼的漂流距离和时间, 大量漂流性卵、仔鱼未能发育到独立游泳阶段即下沉水底, 造成早期阶段的大量损失^[24]。大坝对产漂流性卵鱼类的另一个重要影响是: 大坝破坏了这些鱼类的产卵场。如宜昌产卵场是四大家鱼在长江中规模最大的产卵场, 由于葛洲坝枢纽的修建, 该产卵场 4/5 的范围受到影响, 大部分产卵场丧失了产卵的水文

环境^[25]。此外,大坝还通过改变水流、水温等因子对产漂流性卵鱼类的繁殖发生作用,或推迟成鱼的繁殖时间,或增加仔鱼的死亡率等。

河流生境的同一化,导致鱼类区系的同一化^[26]。不同河流生境的多样性是鱼类多样性的基础,大坝通过减少洪峰流量和增加枯水流量,减小了河流径流的变动幅度,改变了河流水文情势(如水文事件的发生时间和持续时间),造成许多河流鱼类生境的同一化。Poff(2007 年)等^[27]研究了美国 186 条建坝河流的水文变化,通过对比这些河流建坝前后的水文记录,发现由于大坝的干扰,河流的水文情势由建坝前的 16 大类,均质化成建坝后的 7 类,无机环境的趋同现象明显,鱼类生境显示出强烈的同一化趋势,而参照研究的 317 条未建坝河流的生境没有发现同一化现象。

河流水文情势可变性的降低对鱼类多样性影响很大。流量的变动性降低导致河道复杂性下降,从而降低了生境多样性,河流中的鱼类多样性随之降低^[28]。更为糟糕的是生境的改变和外来种入侵,这两个导致多样性降低的主要原因^[26],往往由于大坝存在而同时发生。河流水文情势的均质化,无机环境趋向于相似,导致广布种鱼类更易侵入特有种鱼类分布的河流,并排挤掉本土物种,造成特有种鱼类的灭绝^[29]。Rahel(2003 年)、Poff(2007 年)等^[30,27]认为大坝引起了河流鱼类生境的均质化,有利于广布种鱼类的扩张,不利于特有种鱼类生存,从而造成越来越多的河流具有相同的鱼类区系。Rahel(2003 年)认为鱼类区系同一化是生境均质化、外来种入侵和本土物种灭绝 3 个过程的结果,其中主要原因是生境的变化,生境均质化促进了外来种的侵入和特有种灭绝^[30]。

2.1.2 河流的生态恢复

过度的河流开发导致生物多样性下降、生态系统退化等问题,已经引起了人们的极度关注,河流生态恢复因而成为全球的研究热点^[31]。恢复河流生态系统的理论和方法已经有多篇文献进行了详细的论述^[32-34]。其中,通过大坝的合理运行,模拟天然水文情势,提高河流生态系统的功能是一个经济可行的重要方法。

准确评价建坝前后的水文变化是合理运行大坝,恢复河流生态系统功能的关键。大自然保护协会(TNC, 1996 年)开发的水文变动指示者系统(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)是评价河流生态系统中水文变化的一个重要工具^[35]。IHA

可以利用河流以前的监测资料和模型产生的数据,通过统计参数的年内变化,对比建坝前后水文、生态系统的变化,确定引起生态后果的主要水文因子,评价水文因子在生态系统中的重要值,从而确定河流生态恢复的方向和目标。Brian(1996 年)等人成功运用 IHA 对北卡莱罗纳州 Roanoke 河的水文变化进行了评价^[35]。

由于每条河流所处的地理位置和人文环境不同,在恢复河流生态系统的时候,必须结合河流和大坝的具体情况,综合考虑河流的人类利用需要与生态系统的功能需求,寻找人类与环境的水分配平衡。Brian 和 Gregory(2007 年)在回顾了前人研究的基础上,提出了合理运行大坝,恢复河流生态系统的工作框架(图 2),具有一定的指导作用^[36]。

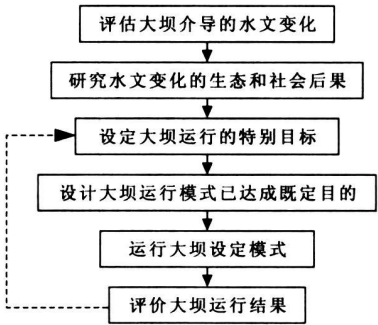


图 2 通过合理运行大坝,恢复河流生态系统的工作框架

Fig. 2 Framework of Restoring River Ecosystem by Reasonable Running of Dam

通过调整大坝运行,恢复河流生态系统功能在国外已有多个成功的实例。如 2002 年 TNC 与美国国防部工程兵团合作,通过对美国河流 Ravannah 的 Thurmond 大坝的运行进行重新设计,在鱼类繁殖期间,模拟自然河流的水文情势,人造洪峰,有利于鱼类产卵和仔鱼进入育幼场所^[37]。Pearsall 等(2005 年)对北卡莱罗纳州 Roanoke 河的两座水电大坝运行重新设计,成功解决了库区长时间高水位对植物的损害,而大坝的经济效益并没有下降^[38]。

2.1.3 河流生态学理论

20 世纪 80、90 年代,是水文生态学理论发展的关键期,相继提出了“河流连续体概念”(River Continuum Concept, RCC)、“序列不连续体概念”(Serial Discontinuity Concept, SDC)等重要理论,为水文生态学的发展奠定了扎实的基础。1980 年 Vannote 等以北美自然未受扰动的河流生态系统的研究结果为依据,提出了“河流连续体概念”^[39]。河流

连续体概念是指在天然河流系统中, 生物种群形成一个从河源到河口的逐渐变化的时空连续体。RCC 在河流发育的初期表现得非常明显, 但在人为因素干扰的景观中却很少发现^[28]。由于人类活动的巨大影响, 许多野外观测的结果与 RCC 不一致, 很难观察到与 RCC 完全相符的实例, 但它仍然是河流生态学中最重要的概念之一。Cummins 等^[40] 1984 年对 RCC 进行很大的修改、完善和拓展, 提高了其在具体领域中的应用效果。

基于人类活动的干扰作用, Ward 和 Stanford 在 1983 年提出了“序列不连续体概念(SDC)”^[41]。SDC 把大坝看作最典型的人为干扰, 认为大坝造成河流连续体分裂, 导致了河流的不连续性, 其目的是解释大坝对河流生态系统结构和功能所产生的相关效应, 并做出预测。SDC 强调了人为干扰(如大坝等)对河流系统的影响, 比较真实地反映了现实情况, 通过将河流连续体概念的纵向连续扩展到横向和垂直方向的连续, 从而实现了理论上的突破, 在规划河流整治及整治后其自然属性的恢复工作中有非常重要的作用^[42]。

此外, 重要的河流生态学理论还有: 洪水脉动概念(Flood Pulse Concept, FPL)、河流生产力模型(Riverine Productivity Model, RPM) 等等, 为水文生态学的发展提供了可靠的理论根基。

2.1.4 生态需水

生态需水研究是生态水资源的主要研究领域, 是水文生态学理论的实践和应用。已有的研究表明人类活动已经严重影响了生物圈水资源的分配, 忽视了生态系统对水资源的需求^[43], 这种忽视带有很大危险性, 直接威胁生态系统的可持续。

虽然早在上世纪中期, 欧、美等有人提出了河流最小环境流量的概念。基于河流物理形态、鱼类和无脊椎动物确定最小或最佳的生态需水流量, 编制了典型鱼类繁衍所必需的河流生境质量与基本生态需水之间的曲线关系。但直到上世纪末, 人们才开始考虑维持整个生态系统完整性的生态水量需求。Gleick(1996 年) 认为生态需水量是恢复和维持生态系统健康发展所需的水量, 是维持生态系统、保护生物多样性和生态整体性所需要提供给生境的最小水量^[44]。但在自然河流生态系统中, 系统处于动态平衡之中, 因此生态需水量的值也应在一定范围内波动, 而且根据一两种典型(重要或濒危)鱼类确定的河流最小流量并不一定有益于整个生态系统, 因为个体与整体的利益有可能存在不一致。

我国生态需水研究起步晚, 但发展较快, 在国外早期偏重“量”的多年研究基础上, 我国研究比较注重“量”和“质”并重。陈浩等^[45](2007 年) 以四川岷河为例, 利用 Montana 法计算了河道维护水生生境最小需水量和最适宜需水量, 结合河道功能区划和水质目标, 最终确定岷河下游河道的最小生态需水量。黄强等^[46](2008 年) 深入探讨了河流生态用水的质与量综合评价, 进一步完善河流生态用水质与量综合评价模型, 并以此模型对黄河进行分析, 结果表明: 黄河生态用水问题不仅是水量短缺, 更严重的是水质问题。

2.2 “气候-土壤-植被”动态研究

“气候-土壤-植被”动态的研究在水文生态学中占有重要的位置。土壤湿度和植被毫无疑问是水文生态学研究中的两个关键因子, 土壤湿度是水分循环的核心因素, 植被则是生态系统的重要组成。早在 1960 年 Gardner 的研究就表明土壤湿度是水限制性生态系统(water limited ecosystems)的核心^[47]。在水限制性生态系统中, 不仅水资源稀缺, 而且降水是间断和不可预知的, 因而成为生态系统的限制因子。Noy-Meir^[48]指出土壤是陆地生态系统中水分的储存和调节者, 土壤能够短时间地储存降水供给生物体使用, 也能通过地表径流、渗透、蒸发等调节水量在不同生物间的分配。Rodriguez-Iturbe 等人^[49]认为植物在“气候-土壤-植被”系统中有着特殊的作用, 植物能够主动吸收系统中的水分, 从而影响系统的水分平衡; 其自身又受到自己所造成的干旱环境的作用, 水分平衡和植物之间相互作用随着自身时空格局的演化, 造成了不同生物群系的基本差别^[50]。Eagleson 1978 和 1982 年的工作^[51, 52]奠定了“气候-土壤-植被”研究的基础。Eagleson 的研究表明, 气候的随机变化改变了土壤团块的含水量, 对植被形成需水压力, 植物通过主动吸收也能对土壤湿度产生影响, 从而形成“气候-土壤-植被”动态, 并建立了动态模型。动态模型的建立和验证是水文生态学很重要的研究方面, 这方面的详细研究可参阅 Rodriguez-Iturbe 等^[53]、Laio^[54]等人的文献。

在我国, “气候-土壤-植被”动态的研究以小尺度的实验较多, 研究多集中在森林、干旱/半干旱等地区。我国开展的以森林为对象的动态研究主要集中于森林的降水截留、枯枝落叶层截持等方面, 以及由此引起的林地土壤水分的变化。曹云等^[55](2007 年) 通过对长江防护林樟树林的定位监测, 研究了

林冠水文效应的变化规律。结果表明: 林冠对降雨的再分配功能受到降雨量的影响, 在不同雨量和雨强级间, 樟树林冠对降雨再分配存在着差异, 樟树林下水分输入存在明显的空间异质性。刘世荣等^[56] (1996 年) 的研究表明, 各类森林生态系统枯落物层的最大持水量与其现存量呈极显著的正相关关系, 阻滞径流速度的效应显著。我国干旱/半干旱地区分布面积广, 淡水资源贫乏, 荒漠化问题日趋严重, 这些地区的水量平衡问题长期以来一直受到研究者的重视。章予舒等^[57] 对塔里木河研究后认为: 在有胡杨林存在条件下, 林下灌木生存与否与 40~ 60 cm 深度土壤含水量相关系数最大, 当此层土壤含水量低于 16% 时, 胡杨林下灌木开始消亡。郑丹等^[58] (2006 年) 详细论述了干旱区地下水与天然植被之间的复杂关系, 它涉及地下水、土壤、植被等相互之间的动态平衡, 从不同角度研究了干旱区地下水与土壤含水量、天然植被、地表荒漠化等关系以及对合理地下水埋深的确定进行了总结分析, 为深入研究干旱区生态环境的演变趋势提供依据。

2.3 湿地研究

在欧洲大陆和英国, 湿地研究在水文生态学中扮演了中心角色^[7]。由 A J Baird 等人编撰的《生态水文学》一书中, 大量的生态水文学术语被用来描述湿地中水位和植物分布的关系, 很多有关生态水文过程的研究成果是建立在湿地生态系统基础上的^[9]。湿地水文生态学着重研究不同尺度的水文与生物格局、过程的耦合特征和相互作用, 并在湿地重建中取得了明显进步。D C Luigi^[59] (2002 年) 应用水文生态学方法验证了植被的分布对重建湿地的影响, 研究表明: 植物通过对河水的扩散, 而不是通过阻碍水流, 增加了沿岸死水区, 因而, 合理地设计植被对重建湿地有重要作用。J Anne^[60] (2002 年) 对澳大利亚 Murray 河流湿地生态系统的修复研究同样表明, 水文生态学方法是修复湿地生态系统的重要方法。

在我国, 比较关注湿地在人类影响下的生态后果、评价及管理。赵广举等^[61] (2006 年) 以太湖平原上的典型湿地为例, 分析了长江下游湿地的变迁和影响其变化的因素。他们认为: 人类活动是引起长江下游湿地变化的主要因素, 不仅引起水域湿地面积的变化, 同时引起了水域湿地空间格局的变化, 表现为自然水域湿地的消失和人工湿地的增加。连煜等^[62] (2008 年) 采用景观生态学的原理和方法, 建立了基于生态水文学的黄河口湿地生态需水及评价

模型, 并评价了黄河口湿地不同补水方案产生的生态效果。王学雷等^[63] (2006 年) 在分析了长江中下游湿地的现状后, 认为长江中下游湿地保护必须从流域管理角度进行规划和保护, 应由过去主要是单块湿地保护向按流域系统保护的转变, 并提出了相关具体措施。

3 应用方面的挑战与展望

3.1 问题与挑战

3.1.1 高强度水电开发负面影响

我国正处于水电开发的高峰期, 出于对清洁能源的需求, 今后 20 a 内将新建一批大型水利工程^[64]。其中最令人瞩目的是金沙江梯级水电开发, 一共规划建设 20 座水电大坝, 这将对脆弱而高多样性的金沙江生态系统造成巨大影响。从三峡大坝对长江鱼类的影响来看, Xie 认为, 三峡大坝将威胁到长江中古老鱼类的生存, 如鲟类、胭脂鱼等^[65]。Xie 等的研究表明, 自 2003 年三峡大坝开始蓄水后, 坝下主要经济鱼类的产量减产了 30%~ 50%, 漂流性卵及仔鱼的丰度下降最多达 95% (表 1)。根据三峡大坝的影响可以看出, 金沙江梯级水电大坝 (很多是仅次于三峡大坝的超大型大坝) 的建设, 将对鱼类产生重要影响, 而且金沙江段是长江鱼类物种数量和特有种最丰富的江段, 是许多特有种和经济鱼类的产卵场和庇护所, 此处的水力梯级开发, 由于梯级大坝的累积效应, 形成的威胁将更加严重。研究表明, 金沙江梯级电站的建设将至少威胁到长江上游 40 种鱼类生存^[66], 其中 19 种是长江特有鱼类^[67], 减少长江中下游的幼鱼丰度^[68]。

表 1 三峡大坝(1997、2002~ 2005 年)坝下四大家鱼卵、仔鱼数量(2003 年蓄水)^[24]

Tab. 1 Numbers of Drift-Sampled Carp (Cyprinidae) Eggs and Larvae of Four Species of Carp Below the Three Gorges Dam^[24]

	1997 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年
卵、仔鱼数 (10 ⁷)	250	190	40. 6	33. 9	10. 5

3.1.2 大坝、沟渠对河流水文影响

Poff 等^[69] (1989)、Richter 等^[35] (1996 年) 认为, 对河流生态系统重要的水文情势包括 5 个因子: 流量、水文事件频率、事件持续时间、何时发生和变化率。大坝的建设, 将极大改变水文情势的时空变化, 如流速、流量、流量频率以及时空分布等特征。一般来说, 大坝建成后, 库区水位上升, 流速减缓, 甚

至形成局部静水;大型水库出现水温分层;下泻低温水造成坝下水温降低;库内泥沙淤积,同时造成清水下泻;大坝运行导致极端流量减少,中等流量增加,降低了河流脉冲式水文周期的变动。三峡工程修建后,坝下流量变化较大,改变了坝下丰枯的水文周期规律:流量趋于均一化,洪水年内发生的频率减少;水位同期相比,在洪水期偏低,而在枯水期偏高^[70]。从目前三峡大坝对坝下水文情势的影响分析,在金沙江修建大量的水电大坝,将对长江的天然径流过程产生巨大的影响。出于实用目的(如防洪、水运等),采用混凝土等硬质材料处理河道、护坡,造出河道横断面几何规则化,对天然河流裁弯取直,形成直线形河道。这些对河道的沟渠化处理,也对河流水文情势有影响。沟渠化河道能导致流速加快,加大了对河床的冲刷,硬质化的河床和护坡割断了河水和地下水的渗透通道,改变了急流与缓流相间、深潭与浅滩交错的格局,造成生境的异质性降低。

3.2 应用中的问题

一个新兴的学科,应当有统一的定义、明确的学科核心和学科边界^[4]。水文生态学的定义问题,不仅仅是水文学家和生态学家各自原有知识体系束缚的问题,更主要的是两种研究哲学的融合。水文学家秉承的牛顿简化主义(Reductionist Newtonian)研究思想与生态学家遵循的达尔文整体哲学体系(Holistic Darwinian)能否在水文生态学领域完成融合是交叉学科发展的关键^[71]。Harte^[72](2002年)列出了2种研究哲学融合的3个基本要素:简单、可证伪(Falsifiable)的模型;探索共用的模式和法则;共同的研究领域。Newman等^[6](2006年)指出等级尺度理论(Hierarchical Scaling Theory)也许是跨越融合难题的一种方法,例如在这个理论框架内,水文学家可以根据不同的组织水平意义(如更加整体的层面),解释现象和建立模型。

生态学和水文学都存在研究尺度问题,在水文生态学研究这个问题表现得更加突出。Newman等^[16]在论述水文生态学面临的挑战中,第一个强调的问题即是研究尺度。尺度问题首先表现在不同的研究中,尺度范围没有统一的标准。其次,尺度转换问题,一个研究尺度下得出的结论和规律,往往并不能通用于其他研究尺度。第三,生态学与水文学研究采用的尺度体系差异巨大。例如生态学家的中尺度研究(群落交错带、生态系统斑块等),对水文学家来说,这些仅仅是水文研究的流域尺度的亚单位^[73]。

3.3 展望与值得关注的科学问题

水文生态学的目标是水资源的可持续利用、人与自然的和谐发展。当前,我国水环境问题十分严峻,大坝的建设与河流生态系统保护间的矛盾日益突出;西部生态环境脆弱,土地荒漠化、水土流失十分严重。水文生态学对我国可持续性发展将发挥重要作用,具有广阔的发展前景。国外的水文生态学研究已经有了较好的基础,发展很快,国内相关研究起步较晚,因而有更多的问题需要关注,尤其应该重点加强:

(1) 加强河流的水文生态学研究,监测大坝建设的生态影响,合理设计大坝的运行。今后的20 a,我国将在长江上游迎来水电开发的高峰期。在金沙江这种生态系统敏感区进行大规模的梯级开发,有相当大的生态风险,因此,加强河流的水文生态学研究,充分利用已有的水文生态学理论对梯级大坝的建设和运行进行监测和指导是非常必要的。

(2) 评价三峡大坝的运行对生态系统影响,探讨相应减缓措施。三峡大坝建设是举世瞩目的伟大工程,其工程效益自不待言,但它对生态与环境也将产生广泛而深远的影响,通过对三峡大坝的运行对生态系统影响评价,探讨相应减缓措施,能有效地避免或降低长江上游的生态风险,也能为以后大坝建设的环保提供大量经验。

(3) 建立全面的生态系统监测网络,加强野外生态系统和水文因子的监测,尤其要注重监测数据的长期积累。生态和水文的系统监测是一项长期而艰巨的工作,涉及面广、监测资料多、数据量大,这些数据在解决很多有争议或有潜在、长期影响的重大问题时有重要作用。

(4) 追踪土地利用与覆被变化等的水文生态学效应,为我国水土防治、环境保护等提供理论依据。我国西部生态环境脆弱,荒漠化日趋严重,随着西部开发战略的实施,很可能会出现许多环境问题。深入了解干旱/半干旱地区的水文生态学机制,能为我国解决沙尘、沙化等急迫问题提供有力支持,为我国水土防治、环境保护等提供理论依据。

(5) 注重新技术、新方法在水文生态学研究中的应用,建立符合我国水文实际的研究模型。我国的水文生态学研究起步较晚,与发达国家相比,系统理论研究和资料积累比较薄弱,因此,要发挥后发优势,参照外国研究的经验,注重新技术、新方法在水文生态学研究中的应用。充分利用遥感和GIS技术,在大尺度水平上研究我国土地覆被、湿地变化等

的水文生态学机制; 积极跟进利用环境同位素技术, 追踪环境体系中的复杂问题; 利用国外的先进建模理论, 结合我国水文资料, 建立符合我国水文实际的研究模型, 探讨水文过程和生态变化的耦合机理。

参考文献:

- [1] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313: 1 068~ 1 072.
- [2] DUDGEON D, ARTHINGTON A H, GESSNER M O, et al. Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges [J]. Biological Reviews, 2006, 81: 163~ 182.
- [3] POPPER K R. The open society and its enemies[M]. London: Routledge and Kegan Paul, 1980.
- [4] HANNAH D M, WOOD P J, SADLER J P. Ecohydrology and hydroecology: A 'new paradigm'? [J]. Hydrological Processes, 2004, 18: 3 439~ 3 445.
- [5] NUTTLE W K. Ecohydrology's past and future in focus[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2002, 83(19): 205.
- [6] WASSEN M J, GROOTJANS A P. Ecohydrology: An interdisciplinary approach for wetland management and restoration [J]. Vegetation, 1996, 126: 1~ 4.
- [7] BAIRD A J, WILBY R L. Eco-Hydrology: Plants and water in terrestrial and aquatic environments[M]. London: Routledge, 1999.
- [8] KEMP J L, HARPER D M, CROSA G A. The habitat-scale ecohydraulics of rivers[J]. Ecological Engineering, 2000, 16: 17~ 29.
- [9] SADLER J P, BELL D, FOWLES A P. The hydroecological controls and conservation value of beetles on exposed riverine sediments in England and Wales[J]. Biological Conservation, 2004, 118: 41~ 56.
- [10] WOOD P J, HANNAH D M, AGNEW M D, et al. Scales of hydroecological variability within a groundwater-dominated stream [J]. Regulated Rivers: Research and Management, 2001, 17: 347~ 367.
- [11] RODRIGUEZ-ITURBE I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics [J]. Water Resources Research, 2000, 36: 3~ 9.
- [12] RODRIGUEZ-ITURBE I. Plants and soil moisture dynamics: A theoretical approach to the ecohydrology of water-controlled ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [13] DUNBAR M J, ACREMAN M C. Applied hydro-ecological sciences for the twenty-first century [M]. Wallingford: IAHS Press, 2001, 1~ 17.
- [14] DAVID D B. An ecologist's perspective of ecohydrology[J]. Bulletin of the Ecological Society of America, 2005, 86: 296~ 300.
- [15] DOLMAN H. Ecohydrology: Patterns and variability in vegetation soil atmosphere interaction [J]. Position Paper for the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences Working Group on Hydrology, 2003, 6: 2~ 3.
- [16] NEWMAN B D, WILCOX B P, ARCHER S R, et al. Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision [J]. Water Resource Research, 2006, 42: W06302.
- [17] ZALEWSKI M. Ecohydrology—the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources [J]. Ecological Engineering, 2000, 16: 1~ 8.
- [18] POFF N L, HART D D. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal [J]. BioScience, 2002, 52(8): 659~ 667.
- [19] HENDRY A P, STEARNS S C. Evolution illuminated: Salmon and their relatives [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2004.
- [20] QUINN T P. The behavior and ecology of pacific salmon and trout [M]. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, 2005.
- [21] WILLIAMS R N. Return to the river—restoring salmon to the Columbia river [M]. Burlington, Massachusetts: Elsevier Academic Press, 2006.
- [22] ROBIN S W, RICHARD W Z, MARK D S, et al. Evolutionary responses by native species to major anthropogenic changes to their ecosystems: Pacific salmon in the Columbia river hydropower system [J]. Molecular Ecology, 2007, 17: 84~ 96.
- [23] BREDER C M, ROSEN D E. Modes of reproduction in fishes [M]. Garden City, New York, USA: Natural History Press, 1966.
- [24] XIE S G, LI Z J, LIU J S, et al. Fisheries of the Yangtze River show immediate impacts of the Three Gorges Dam [J]. Fisheries, 2007, 32(7): 343~ 344.
- [25] 易伯鲁, 余志堂, 梁秋燊, 等. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1988: 1~ 46.
- [26] PETER B M, JEFFREY F M. Homogenous rivers, homogenous faunas [J]. PANS, 2007, 104(14): 5 711~ 5 712.
- [27] POFF N L, OLDEN J D, MERRITT D M, et al. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications [J]. PANS, 2007, 104(14): 5 732~ 5 737.
- [28] MCKINNEY M L, LOCKWOOD J L. Biotic homogenization: a few winners replacing many losers in the next mass extinction [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999, 14(11): 450~ 453.
- [29] BALTZ D M, MOYLE P B. Invasion resistance to introduced species by a native assemblage of California stream fishes [J]. Ecological Application, 1993, 3: 246~ 255.
- [30] RAHEL F J. Homogenous of freshwater faunas [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 291~ 315.
- [31] ORMEROD S J. Restoration in applied ecology: Editor's introduction [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40: 44~ 50.
- [32] MUHAR S, SCHMUTZ S, JUNGWIRTH M. River restoration

- tion concepts goals and perspectives[J]. *Hydrobiologia*, 1995, 303: 183~ 194.
- [33] GILLER P S. River restoration: Seeking ecological standards, editor's introduction[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42: 201~ 207.
- [34] DUDGEON D. River management for conservation of freshwater biodiversity in monsoonal Asia[J]. *Ecology and Society*, 2005, 10(2): 15.
- [35] RICHTER B D, JEFFREY V B, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem[J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1 163~ 1 174.
- [36] RICHTER B D, THOMAS G A. Restoring environmental flows by modifying dam operations[J]. *Ecology and Society*, 2007, 12(1): 12.
- [37] RICHTER B D, WARNER A T, MEYER J L, et al. A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations[J]. *River Research and Applications*, 2006, 2: 297~ 318.
- [38] PEARSALL S H, MCCRODDEN B J, TOWNSEND P A. Adaptive management of flows in the lower Roanoke River, North Carolina, USA[J]. *Environmental Management*, 2005, 35: 353~ 367.
- [39] VAN NOTE R L G W, MINSHALL K W, CUMMINS J R, et al. The river continuum concept[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37: 130~ 137.
- [40] CUMMINS K M, MINSHALL W G, SEDELL J R, et al. Stream ecosystem theory[J]. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 1984, 22: 1 818~ 1 827.
- [41] WARD J V, STANDFORD J A. The serial discontinuity concept of lotic ecosystem[C]//Fontaine T (Ed). *Dynamics of Lotic Ecosystems*. Am Arbor Publishers, 1983: 56~ 179.
- [42] WARD J V, STANDFORD J A. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by regulation[J]. *Regal Rivers*, 1995, 11: 105~ 119.
- [43] GLEICK P, LOH P, GOMEZ S, et al. California water 2020: A sustainable vision. Pacific Institute Report[R]. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security. Oakland, California, USA, 1995.
- [44] GLEICK P H. Minimum water requirements for human activities: meeting basic needs[J]. *Water International*, 1996, 21: 83~ 92.
- [45] 陈 浩, 郝芳华, 欧阳威, 等. 成都平原岷河下游生态环境需水量研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(5): 644~ 649.
- [46] 黄 强, 张泽中, 李 群, 等. 河流生态用水综合评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(6): 939~ 943.
- [47] GARDNER W R. Dynamic aspects of water availability to plants[J]. *Soil Science*, 1960, 89(2): 63~ 73.
- [48] NOY-MEIR I. Desert ecosystems: Environment and producers [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 25~ 44.
- [49] RODRIGUEZ-ITU RBE I, PORPORATO A, LAIO F, et al. Plant strategies to cope with stochastic soil water availability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(23): 4 495.
- [50] PORPORATO A, RODRIGUEZ-ITU RBE I. Ecohydrology — A challenging multidisciplinary research perspective [J]. *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques*, 2002, 47(5): 811~ 821.
- [51] EAGLESON P S. Climate, soil, and vegetation. I Introduction to water balance dynamics [J]. *Water Resource Research*, 1978, 14(5): 705~ 712.
- [52] EAGLESON P S. Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation system. I. theory and hypothesis[J]. *Water Resource Research*, 1982, 18(2): 325~ 340.
- [53] RODRIGUEZ-ITU RBE I, PORPORATO A, RIDOLFI L, et al. Probabilistic modelling of water balance at a point: The role of climate, soil and vegetation[J]. *Proceedings of the Royal Society*, 2002, 455: 3 789~ 3 805.
- [54] LAIO F, PORPORATO A, RODRIGUEZ-ITU RBE I. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrological processes and responses to water stress. II. Probabilistic soil moisture dynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(7): 707~ 723.
- [55] 曹 云, 黄志刚, 欧阳志云, 等. 长江防护林——樟树林对降雨再分配的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(5): 603~ 608.
- [56] 刘世荣, 温远光, 王 兵. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [57] 章予舒, 王立新, 张红旗, 等. 塔里木河下游沙漠化土壤性质及分形特征[J]. *资源科学*, 2004, 26(5): 11~ 16.
- [58] 郑 丹, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 干旱区地下水与天然植被关系研究综述[J]. *资源科学*, 2005, 27(4): 160~ 167.
- [59] LUIGI D C, BENDORICCHIO G. Influence of vegetation on the hydraulic behaviour of a reconstructed wetland[J]. *Ecohydrology & hydrobiology*, 2002, 2: 283~ 288.
- [60] ANNE J. Applying ecohydrology to on-ground management of wetlands and floodplains—' Learning by doing' [J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2002, 2: 67~ 78.
- [61] 赵广举, 张 鹏, 高俊峰, 等. 长江下游典型水域湿地近百年变化分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(5): 560~ 563.
- [62] 连 煜, 王新功, 黄 翊, 等. 基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价[J]. *地理学报*, 2008, 63(5): 451~ 461.
- [63] 王学雷, 许厚泽, 蔡述明. 长江中下游湿地保护与流域生态管理[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(5): 564~ 568.
- [64] 高季章. 建立生态环境友好的水电建设体系[J]. *中国水利*, 2004, 13: 6~ 9.
- [65] XIE P. Three Gorges Dam: risk to ancient fish[J]. *Science*, 2003, 302: 1 149.
- [66] 刘建康, 曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策[J]. *长江流域资源与环境*, 1992, 1(1): 17~ 23.
- [67] FU C Z, WU J H, CHEN J K, et al. Freshwater fish biodiversity in the Yangtze River basin of China: Patterns, threats and conservation [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2003, 12: 1 649~ 1 685.

[68] 许蕴轩, 邓中遴, 余志堂, 等. 长江的铜鱼生物学及三峡水利枢纽对铜鱼资源的影响[J]. 水生生物学报, 1981, 7(3): 271~ 294.

[69] POFF N L, WARD J V. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, 46: 1 805~ 1 818.

[70] 于国荣, 夏自强, 叶 辉, 等. 大坝下游河段的河流生态径流调控研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(4): 606~ 611.

[71] HANNAH D M, SADLER J P, WOOD P J. Hydroecology and ecohydrology: A potential route forward? [J]. Hydrological Processes, 2007, 21: 3 385~ 3 390.

[72] HARTE J. Towards a synthesis of Newtonian and Darwinian worldview[J]. Physics Today, 2002, 55(10): 29~ 43.

[73] JANAUER G A. Ecohydrology: Fusing concepts and scales [J]. Ecological Engineering, 2000, 16: 9~ 16.

PROGRESS AND PROSPECT OF HYDROECOLOGY RESEARCH

CHENG Fei^{1,2}, WU Qing-jiang¹, XIE Song-guang¹

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hydroecology is a new science field that studies the cross-cutting areas between ecology and hydrology. Its research aims to understand the structure and function of hydrological factors and ecosystem, to achieve the balance between the water needs of society and the environment. It is scientific foundation of water resource management. So hydroecology provides opportunities for restoration and enhancement of the capacity of ecosystems against human impacts at various spatial and temporal scales. Hydroecology has been great development since 1992 during the Dublin International Conference on Water and Environment, and then became a hot spot of research soon in oversea. At the present the freshwater resources are becoming the most limiting factor not only for development but even for persistence of some communities in many areas of the world. In China, up to now, freshwater management dealt mostly with economic needs for shipping and hydropower and the elimination of threats such as floods, droughts and source pollution, the conflict is increasing between constructing dam and protecting environment. Ecosystem is very vulnerable and water resource is sparse in the western China, problems of ecosystem protection are severer, so hydroecology is more important. The paper systematically introduced progress of hydroecology, discussed its definition, researching field, achievement and prospect. Because river and stream are the critical research area central of hydroecology, and dams have been constructed in many rivers in China, especially in the upstream of the Yangtze River, the paper calls more attention to ecological effect of dam, and emphasizes the use of hydroecology to ecological problem of dam construction.

Key words: hydroecology; progress; prospect; river; dam; ecosystem