

# 河流生态系统结构功能模型研究

董哲仁

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 回顾了河流生态系统结构功能模型的研究进展,介绍了多种重要的概念和模型。在此基础上,提出了河流生态系统结构功能整体模型,它是由河流流态-生态结构功能4维连续体模型、水文情势-河流生态过程耦合模型、地貌景观空间异质性-生物群落多样性耦合模型3个子模型组成。整体模型建立了河流流态、水文情势和地貌景观这3大类生境因子与河流生态系统结构功能和生态过程的相关关系,基本上抽象概括了河流生态系统的主要特征。在模型中除了考虑自然力因素以外,还考虑了水利水电工程设施的干扰作用。

**关键词:** 河流;生态系统结构;功能模型;整体模型;流态;水文情势;地貌景观

**中图分类号:** X143      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-3075(2008)01-0001-07

## 前言

河流生态系统的结构与功能是研究河流生态系统的核心问题,其本质是研究河流生命系统与生命支持系统的相互关系。近20多年来,各国学者提出了不少概念和模型,试图从这个复杂、开放、动态、非平衡和非线性的河流生态系统中抽象、概括出一些主要特征,增进对系统的理解。这些概念和模型大多是在不同的空间尺度上,分别考虑了不同的生境因子,试图建立起生态过程与生境因子之间的相关关系。随着生态学的理论发展和河流生态修复的实践经验积累,有必要对现存的概念和模型进行整合和发展,构成河流生态系统结构功能整体模型。

## 1 河流生态系统结构功能模型研究进展

迄今提出的较有影响的河流生态系统结构与功能的概念模型有多种,这些概念模型基于对不同自然区域不同类型河流的调查,探索河流生态系统结构与功能与非生命变量之间的相关关系(Lorenz C M et al, 1997)。多数概念模型是针对未被干扰的自然河流,少数概念模型考虑了人类活动因素。各种概念模型的尺度不同,从流域、景观、河流廊道到河段,其维数从顺河向一维到包括时间变量的四维。各个模型采用的非生命变量有不同侧重点,大体包括水文学、水力学、河流地貌学3类。生态系统结构主要研究水生生物的区域特征和演变、流域内物种多样性、食物网构成和随时间的变化、负反馈调节

等。生态系统功能主要考虑了包括鱼类在内的生物群落对各种非生命因子的适应性,在外界环境驱动下的物种流动、物质循环、能量流动、信息流动的方式,生物生产量与栖息地质量的关系等。尽管这些模型各自有其局限性,但是它们提供了从不同角度理解河流生态系统的概念框架。现择要介绍如下。

### 1.1 地带性概念

Huet (1954) 和 Illies 等(1963)提出的地带性概念(Zonation concept)是河流生态系统整体性描述的首次尝试。生物地带性概念的内涵是按照鱼类种群或大型无脊椎动物种群特征把河流划分成若干区域,地带性反映了不同区域水温和流速对于水生生物的影响。

### 1.2 河流连续体概念

Vannote (1980)提出的河流连续体概念(River continuum concept, RCC)是河流生态学发展史中试图描述沿整条河流生物群落结构和功能特征的首次尝试,其影响深远。RCC概念是针对北美未被干扰的自然河流,强调河流生物群落的结构和功能与非生命环境的适应性。RCC描述了从源头到河口水力梯度的连续性;分析了上中下游非生命要素的变化引起的生物生产力的变化;不同颗粒的有机物质输移、遮荫效应影响以及河床基底碎石作用对于食物网的影响等。RCC问世后,一些河流的观察资料验证了这个理论,但是也有一些河流现场观测资料并不遵循这个理论,这主要取决于气候、地貌、水质、局地特征以及支流情况等多种因素。RCC概念的意义在于提供了一种未被干扰的自然河流参照体系,指出了河流顺河方向水力连续性和生物组分分布连续性的相关性。其后,鉴于RCC未能考虑汛期

收稿日期:2008-08-07

作者简介:董哲仁,男,1943年生,北京市人,教授,博士生导师,研究方向为生态水工学。

洪水向洪泛滩区侧向漫溢所引起的生态过程,并且为强调河流生态系统的动态特征,Ward等学者将连续体概念进一步发展为具有纵向、横向、竖向和时间尺度的河流四维连续体(Ward J V,1980)。

### 1.3 溪流水力学概念

Statzner和Higler(1986)提出的溪流水力学概念(stream hydraulics concept,SHC)认为,溪流物种组合的变化是与溪流水力学条件变化(包括流速、水深、基底糙率和水面坡度等参数变化)密切联系的,这些参数又与地貌特征和水文条件密切相关。SHC分析了流速场随时间和空间发生的变化对生物区系特别是底栖无脊椎动物和藻类产生的影响。SHC促进了其后生态水力学的研究和发展。

### 1.4 资源螺旋线概念

Wallace等(1977)提出的资源螺旋线概念(spiralling resource concept, SRC)是对RCC理论的补充。SRC详细描述了营养物质沿河流的输移循环过程。SRC定义了一个营养物质向下游完成输移循环的空间维度,这就形成一种开口循环的螺旋线。螺旋线可以用单位长度 $S$ 量测, $S$ 的定义是当完成一个营养单元(例如碳)循环的河流水流的平均距离。螺旋线长度 $S$ 越短,说明营养物质利用效率越高,即在给定的河段内营养单元会多次进行再循环。螺旋线是下游传输率和保持力的函数。基于水流条件的传输率越高则螺旋线越长;保持力是在生态系统中营养物的再循环,包括树木残枝、漂石、大型植物河床以及沉积物等物理储藏、生物储藏作用。保持力高则螺旋线尺度越短。一般来说,在森林覆盖的河流上游、河流两岸和洪泛滩区保持力都较高,对应的 $S$ 较短。

### 1.5 串连非连续体概念

串连非连续体概念(serial discontinuity concept, SDC)是Ward和Starford(1983)为完善RCC而提出的理论,意在考虑水坝对河流的生态影响。因为水坝引起了河流连续性的中断,导致河流生命和非生命参数的变化以及生态过程的变化,需要建立一种模型来评估这种胁迫效应。SDC定义了2组参数来评估水坝对于河流生态系统结构与功能的影响。一组参数称为“非连续性距离”,定义为水坝对于上下游影响范围的沿河距离,超过这个距离水坝的胁迫效应明显减弱,参数包括水文类和生物类;另一组参数为强度(intensity),定义为径流调节引起的参数绝对变化,表示为河流纵向同一断面上自然径流条件下的参数与人工径流调节的参数之差。这组参数反

映水坝运行期内人工径流调节造成影响的强烈程度。SDC也考虑了堤防阻止洪水向洪泛滩区漫溢的生态影响,以及径流调节削弱洪水脉冲的作用。在SDC中非生命因子包括营养物质的输移和水温等。

### 1.6 洪水脉冲理论

Junk基于在亚马逊河和密西西比河的长期观测和数据积累,于1989年提出了洪水脉冲概念(Flood Pulse Concept, FPC)(Junk J W, Bayley P B and Sparks R E,1989)。Junk认为,洪水脉冲是河流-洪水滩区系统生物生存、生产力和相互作用的主要驱动力。如果说河流连续体概念重点描述沿河流流向的生态过程,那么,洪水脉冲概念则更关注洪水期水流向洪泛滩区侧向漫溢产生的营养物质循环和能量传递的生态过程,同时还关注水文情势特别是水位涨落过程对于生物过程的影响。因此可以说,洪水脉冲概念是对河流连续体概念的补充和发展。在FPC提出后的10余年内,不少学者对于这个概念进行了实地观测验证和完善,从而使RCC成为河流生态学中一个具有广泛影响的概念。洪水脉冲把河流与滩区动态地联结起来,形成了河流-滩区系统有机物的高效利用系统,促进水生物种与陆生物种间的能量交换和物质循环,完善食物网结构,促进鱼类等生物量的提高。洪水脉冲系统以随机的方式改变连通性的时空格局,从而形成高度异质性的栖息地特征。洪水水位涨落引起的生态过程,直接或间接影响河流-滩区系统的水生或陆生生物群落的组成和种群密度。洪水脉冲强化了河流的信息流功能,引发不同的行为特点,比如鸟类迁徙、鱼类洄游、涉禽的繁殖以及陆生无脊椎动物的繁殖和迁徙。总之,洪水脉冲增加了生物生产力,提高了生物群落多样性。

### 1.7 河流生产力模型

河流生产力模型(riverine productivity model, RPM)是Thorp和DeLong(1994)提出的一种假设。RPM针对有洪泛滩区的河流,重点考察河流侧向的物质和能量的交换过程。RPM认为不仅河流本身传输营养物质,而且岸边带的乡土种植物以及从陆地向河流的物质输入也都做出了贡献。生物群落的组分和次级生产力在河流的不同地点是不同的,这主要取决于当地栖息地状况和营养物质的供应方式。在近岸区域因栖息地的多样性以及河岸地区具有的对于有机物的保持力,因此可以发现这些地带的大型无脊椎动物的密度较高。

### 1.8 流域概念

流域概念 (Catchment concepts) 是 Frissel 等 (1986) 于 1986 年提出的, 强调了河流与整个流域时空尺度的关系, 并且建议了河流栖息地从河床直到池塘、浅滩和小型栖息地的分级框架。其后一些学者发展了流域概念, Gardiner (1991) 和 Naiman (1992) 认为在不同的空间和时间尺度下, 综合的结构和功能特征是在不同的干扰情势下产生的。Petts (1994) 进一步总结了河流生态系统的 5 项特征; 描述河流是一个三维的, 被水文条件和河流地貌条件所驱动, 由食物网形成特定结构的, 以螺旋线过程为特征, 基于水流变化、泥沙运动、河床演变的系统。Townsend (1996) 提出了在流域尺度上河流和河段的动态的分级框架概念, 试图预测在流域范围内生态变量的空间与时间格局。比如预测在流域各部分的有机物质源, 包括河流传输、河边输入、河床内源等; 他还强调了动态环境中时间维度的重要性, 像水流过程变化和洪水脉冲等这些依时性因子都会影响系统的结构与功能。

### 1.9 自然水流范式

Poff 和 Allan 等 (1997) 于 1997 年提出的自然水流范式 (nature flow paradigm, NFP) 认为, 未被干扰状况下的自然水流对于河流生态系统整体性和支持土著物种多样性具有关键意义。自然水流用 5 种水文因子表示: 水量、频率、时机、延续时间和过程变化率。这些因子的组合不但表示水量, 也可以描述整个水文过程。动态的水流条件对河流的营养物质输移转化以及泥沙运动产生重要影响, 这些因素造就了河床-滩区系统的地貌特征和异质性, 形成了与之匹配的自然栖息地。可以说, 依靠大变幅的水流在河流系统内创造和维持了各种形态的栖息地。人类活动包括土地使用方式改变和水利工程, 改变了自然水文过程, 打破了水流与泥沙运动的平衡, 还造成水流中断, 水系阻隔, 在不同尺度上改变了栖息地条件。在河流生态修复工程中, 可以把自然水流作为一种参照系统。如果定义了自然水流条件, 就可以分析人类活动是改变了自然水流的哪些因子并借以反映人类活动的影响。如何针对特定的河流确定自然流, 是一个复杂的问题, 但是绝对不可用平均流量。因为生态系统过程是非线性的。比如, 一半适宜流量并不能激发一半数量的鱼类; 一半平滩流量并不能淹没一半滩区等等。在河流修复工程中, 不可能完全恢复自然水流情势, 需要各利益相关者的协商, 确定合理、可行的目标。

### 1.10 近岸保持力概念

Schiemer 等 (2001) 基于对奥地利境内多瑙河的研究, 提出了近岸保持力概念 (inshore retentivity concept, IRC)。IRC 研究的对象是渠道化的或人工径流调节的河流。IRC 认为, 近岸地貌与水文因子的交互作用创造了生物区地貌栖息地条件。河流沿线的沙洲、江心岛和河湾等地貌条件以及水文条件, 决定了局部地区流速和温度分布格局, 而流速和温度对于岸边物种的生态过程十分重要。IRC 认为河流的蜿蜒度和水体保持力是影响生物生产力的重要因素, 有充分的证据说明河流浮游动物在具有良好保持力的近岸区域内繁殖, 在水位升高、水体交换增强以后进入到河床。近岸保持力对鱼类的小型栖息地意义重大。幼鱼从临近的河道内产卵场漂流到近岸地区, 幼鱼被限制在近岸的低流速区域。近岸区域的高度蜿蜒性提供了生物个体早期发育所需要的动态小型栖息地, 当主河道发生大水时近岸区域又成为幼鱼的避难所。近岸区域依靠增加浮游生物和较高温度, 为幼鱼发育度过脆弱期、降低死亡率创造了条件。治河工程改变了沿岸群落交错带的结构性质, 降低了主流与滩区的连通性, 从而降低了近岸保持力。

对上述 10 种概念模型的综合分析见表 1。

## 2 河流生态系统结构功能整体模型

上述概念模型都是从不同的角度对河流生态系统结构与功能的不同侧面进行描述和概括。随着河流生态学理论的发展和河流生态修复经验的积累, 有必要按照整体论方法对于各种概念模型进行整合和发展。作为一种探索, 笔者提出了“河流生态系统结构功能整体模型” (The Holistic Model of Structure and Function for River Ecosystem), 试图形成统一的整体概念模型。所谓“整体模型”意在建立河流流态、水文情势和地貌景观这 3 大类生境因子与河流生态系统的结构功能相关关系, 以期涵盖河流生态系统的主要特征。构建河流生态系统结构功能整体模型的目的, 一是探索河流生态系统的自然规律, 二是提供流域可持续管理等实践活动的科学基础。河流生态系统结构功能整体模型由以下 3 种子模型构成: 河流流态-生态结构功能四维连续体模型, 水文情势-河流生态过程耦合模型, 地貌景观空间异质性-生物群落多样性耦合模型 (Kondolf G M et al, 2003; Gary J Brierley et al, 2005)。

### 2.1 河流流态-生态结构功能四维连续体子模型

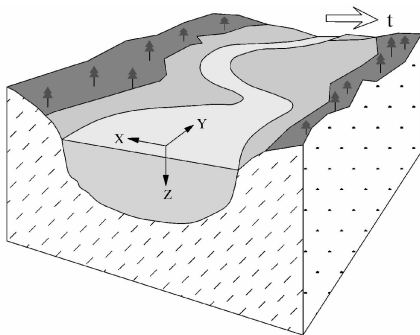
所谓“河流流态-生态结构功能 4 维连续体模

型”是基于对河流生态系统结构功能特征的认识(图 1)。这个模型强调了生物群落与河流流态的依存关系,描述了河流流态沿河流三维方向存在着连续性,由此产生了生物群落沿河流三维连续分布特征以及生态系统结构功能的三维连续性特征。河流

流态-生态结构功能四维连续体模型是由以下 4 种连续性概念组成的:河流流态的三维连续性,生物群落结构三维连续性,物质流、能量流和信息流的三维连续性,河流生态系统结构和功能的动态性。

表 1 河流生态系统结构功能概念模型的综合分析

概念	河流类型	尺度与维数	关键非生命变量	系统功能特征	系统结构特征
地带性概念	未干扰自然河流	顺河向	流速、温度	鱼类适应性、底栖动物对温度和流速的适应性	鱼类和底栖动物群区域
河流连续体概念	未干扰自然河流	顺河向	河流大小、能源、有机物、光线	有机物输移和处理	摄食群落功能转移
溪流水力学概念	温带的未干扰的自然河流	顺河向	流速、水深、河床糙率、水面坡降	底栖动物对水力学干扰的适应性	底栖动物群落区
资源螺旋线概念		顺河向	流速、自然保持力机制、营养限制	螺旋线	生物群落(食物网)
串连非连续体概念	受控制的河流或滩区	顺河向	水坝位置	有机物输移过程和生物多样性	功能性摄食群落比例向上游或下游变化
洪水脉冲理论	大型平原河流	侧向	洪水脉冲:洪水延时、频率、发生时机和洪峰。水质、洪泛滩区的尺寸和特征	增加生物生产力,营养物质在滩区的再循环	在洪泛滩区水-陆相的转化、栖息地和物种多样性
河流生产力模型	具有滩区的窄长型大河	侧向	岸区的类型和密度、保持力结构、近岸区流速	营养物质和泥沙输移转化	功能性取食群体的变化
流域概念	全流域	顺河向、侧向、垂直、时间	时间、空间尺度、非生命变量尺度	在流域尺度的营养循环	物种在流域尺度上的分布
自然流范式	未被干扰自然河流	顺河向	水文参数:水量、频率、时机、延续时间、变化率	栖息地质量	物种变化
近岸保持力概念	筑坝和渠道化河流	顺河向、侧向	流速、温度、蜿蜒度	鱼类适应性	幼鱼生长和避难、浮游生物



X: 河流侧向漫溢方向; Y: 河流流动方向;  
Z: 河流垂直渗透方向; t: 沿时间流向

图 1 河流 4 维方向

所谓“河流流态”可以理解为河流的水力学条件。纵向 Y 方向代表河流的流动方向,是主导方向,河流的流速、流量、水位、脉动压力、水温等沿上中下游都是连续分布的,反映了河流顺水流方向的连续性。当洪水发生时,河水向侧向 X 方向漫溢,使主流、河滩、河汊、静水区和湿地连成一体,形成复

杂的水流系统,这就是河流侧向 X 轴的连通性。竖向 Z 轴是地表水与地下水连接的通道,通过渗透的方式向地下水补给,因此在 Z 方向水体的连续性可以理解为水体渗透性。

河流生物群落结构连续性是指生物群落随河流水力学参数连续性特征呈现的连续性分布特征。这不仅反映在沿河流岸边植被的连续性分布,而且反映在水生动物、无脊椎动物、昆虫、两栖动物、水禽和哺乳动物等都是遵循连续分布的规律,形成丰富有序的食物链(网)。这种连续性的产生是由于在河流生态系统的演替过程中,生物群落对于水域生境条件不断进行调整和适应,反映了生物群落与淡水生境的适应性和相关性。

物质流、能量流和信息流的连续性,是由于河流是生态系统营养物质输移、扩散的主通道,不仅在顺水流 Y 方向,而且通过向地下含水层的补给(Z 向)以及在汛期河水向洪泛滩区的漫溢(X 向)完成营

养物质的输移和扩散。另外, 河流还肩负着传递信息流的任务。河流通过水位的消涨、流速以及水温的变化, 为诸多的鱼类、水禽、鸟类和其它水生生物传递着生命节律的信号。

人类活动的影响主要表现在建设水坝和堤防对于连续性的干扰。水坝造成了河流纵向的非连续

性, 不仅对鱼类的洄游形成障碍, 更重要的是改变了营养物质的输移条件(图 2)。防洪堤防妨碍了汛期主流的侧向漫溢, 使主流与洪泛滩区、湿地、静水区、河汊之间无法沟通, 阻碍了物种流、物质流、能量流和信息流在侧向连续流动, 形成了一种侧向的河流非连续性。

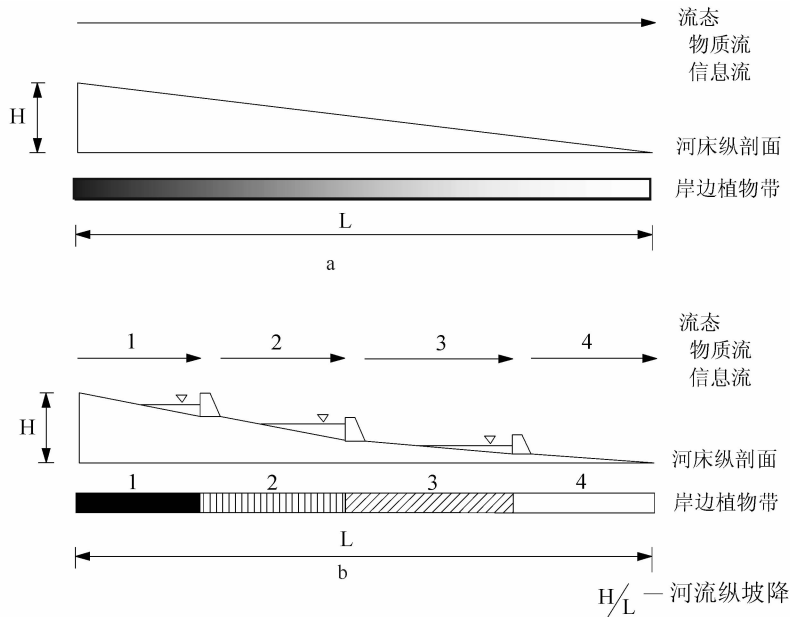


图 2 河流流态-生态结构功能四维连续体子模型示意

## 2.2 水文情势-河流生态过程耦合子模型

水文情势(hydrological regime)既包括流量、水量, 也包括水文过程。水文情势是河流生物群落重要的生境条件之一, 河流系统的生物过程对于水文情势的变化呈现明显动态响应。反之, 生物过程对水文循环要素也产生重要的影响, 包括涵养水分、局地气候等, 二者形成了一种耦合关系。

天然河道内需要保持一定的流量维持河岸带和水域生物处于健康状况, 保证地下水补给, 具有一定的输沙能力以及维持景观的审美价值。特别是存在用水竞争的河流, 维持其正常生态系统功能所拥有的水量尤为必要。

水文过程的年丰枯变化, 引发大量物种的不同行为特点(behavioral trait), 与物种的生物过程相耦合。观测资料表明, 鱼类和其他一些水生生物依据水文情势的丰枯变化, 完成产卵、孵化、生长、避难、洄游和迁徙等生命活动。在汛期, 洪水脉冲成为河流-洪泛滩区系统生物生存、生产力和相互作用的主要驱动力。洪水把河流与滩区动态地联结起来, 形成了河流-滩区系统有机物的高效利用系统, 促进水生生物种与陆生物种间的能量交换和物质循环,

完善食物网结构, 促进鱼类等生物量的提高。

人类活动的主要影响主要表现在: 从河道超量引水, 导致河流径流大幅度下降, 以致无法保证河流生态系统的基本需求。另外水库调度遵循防洪和兴利调度原则, 呈现水文过程均一化特征, 导致洪水脉冲作用削弱。再者, 由于堤防的强约束使洪水脉冲作用范围减少, 加之大量的闸坝阻拦了河流与湖泊、湿地之间的连通, 使洪水脉冲失去其物理基础。

## 2.3 地貌景观空间异质性-生物群落多样性耦合子模型

景观格局(landscape pattern)指空间结构特征, 包括景观组成的多样性和空间配置。空间异质性(spatial heterogeneity)是指系统特征在空间分布上的复杂性和变异性。在景观生态学中, 景观格局是用缀块、廊道和基底的组合进行描述的。河流生态系统生境格局因子包括水文、气象、地貌等。大量资料表明, 生物群落多样性与非生物环境的空间异质性存在着正相关关系, 这种关系反映了生命系统与非生命系统之间的依存与耦合关系(Ward J V, 1980)。实际上, 一个区域的生境空间异质性越高, 就意味着创造了多样的小生境, 允许更多的物种共

存。在河流廊道( river corridor)尺度的景观格局包括2个方面:一是水文学和水力学因子时空分布及其变异性,二是地貌学意义上各种成分的空间配置及其复杂性。后者的景观格局空间异质性在3维方向的特征表现为:在河流纵向表现为河流的蜿蜒性,河流横断面表现为几何形状多样性,在沿水深方向表现出水体的渗透性。河流地貌和形态学特征是水流的水力学边界条件,如果河流在上述三维方向都具有丰富的景观异质性,就会形成浅滩与深潭交错、急流与缓流相间、植被错落有致、水流消长自如的景观空间格局。

大规模的治河工程使河流的地貌景观格局发生了不同程度的变化。自然河流被人工渠道化,蜿蜒性的河流被裁弯取直;河流横断面改变成矩形、梯形等规则几何断面;采用不透水的硬质材料作堤防或河岸护坡等,导致自然河流地貌景观空间异质性明显下降(董哲仁,2007;董哲仁等,2007)。

### 3 小结

河流生态系统结构功能概念模型研究,一直是河流生态学关注的热点。河流生态系统结构功能整体模型是对现存的相关模型的整合和发展。河流生态系统结构功能概念模型明确了河流流态、水文情势和地貌景观是河流生境的3大要素,注重河流生命系统与生命支持系统的动态的耦合关系;同时克服了原有模型以自然河流为对象的局限性,综合考虑了人类经济活动和工程设施的干扰作用。

河流生态系统结构功能整体模型属于概念性模型,进一步的研究工作似应聚焦于模型的定量化或半定量化。生态水力学、生态水文学和景观格局分析等可能作为技术工具对于模型的完善和发展发挥作用。

#### 参考文献:

董哲仁. 2007. 探索生态水利工程学[J]. 中国工程科学, 9(1): 1-7.

董哲仁, 孙东亚, 等. 2007. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社.

Gardiner J L. 1991. River Project and Conservation - A Manual for Holistic Appraisal [M]. Chichester : John Wiley & Sons Ltd.

Frissel C A, Liss W J, et al. 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification; viewing stream in a watershed context [J]. Environ. Mgmt, 10:199-214.

Gary J Brierley, Kirstie A. 2005. Fryirs, Geomorphology and River Management - Application of the river styles fram-

work [M]. Australia : Blackwell Science Ltd.

Huet M. 1954. Biologie, profiles en travers des eaux courantes [J]. Bull. Fr. Piscicul., 175:41-53.

Junk J W, Bayley P B, Sparks R E. 1989. The flood pulse concept in river - floodplain system [C]// Dodge D P. Proceedings of the International Large River Symposium. Ottawa; Can. J. Fish Aquat. Sci. Spec. Publ.

Kondolf G M, Piegay H. 2003. Tools in fluvial geomorphology [M]. England : John Wiley & Sons Ltd.

Lorenz C M. et al. 1997. Concepts in river ecology; implication for indicator [J], Regulated River : research & management, 13:501-516.

Illies J and Botosaneanu L. 1963. Problemes et methodes de la classification et de la zonation ecologiques des eaux courantes, considerees surtout du point de vue faunistique [J]. Mitt. Internat. Verein. Verein. Limnol., 12:1-57.

Nainan R J, et al. 1992. General principles of classification and the assessment of conservation potential in river [C]// Boon P J, Clow. River conservation and management. Chichester : John Wiley & Sons Ltd.

Petts G E. 1994. River; dynamic component of catchment ecosystems [M]// Calow P and Petts G E. The River Handbook. Hydrological and Ecological Principles, Vol. 2. Oxford: Blackwell Scientific Publication.

Poff N L, Allan J D, et al. 1997. The Natural Flow Regime-A paradigm for river conservation and restoration [J]. BioScience, 47(11): 769-784.

Statzner B and Higler B. 1986. Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns [J]. Freshwat. Biol., 16:127-139.

Schiemer F, Keckeis H. 2001. "The inshore retention concept" and its significance for large river [J]. Hydrobiol. Sppl., 12(2-4): 509-516.

Thorp J H and Delong M D. 1994. The riverine productivity model; an view of carbon sources and organic processing in large river ecosystem [J]. Oikos, 70:305-308.

Townsend C R. 1996. Concepts in river ecology : pattern and process in the catchment hierarchy [J]. Algol. Stud., 113:3-24.

Vannote R L. 1980. The river continuum concept [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 37:130-137.

Ward J V. 1980. The Four - dimensional nature of lotic ecosystem [J]. Can. J. Fish. Aqua. Sci., 37: 130-137.

Wallace J B, Webster J R, et al. 1977. The role of filter - feeders in flowing waters [J]. Arch. Hydrobiol., 79:506-532.

Ward J V and Stanford J A. 1983. The serial discontinuity con-

cept of lotic ecosystem[C]// Fontaine T D and Bartell S  
M. Dynamics of Lotic Ecosystems. Ann Arbor: Ann Arbor  
Science Publishers.

(责任编辑 张俊友)

## The Research on Structure and Function Model of River Ecosystem

DONG Zhe-ren

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The development of river ecosystem ecology and some of most important structural and functional concepts of river ecosystem were reviewed. The holistic river ecosystem structure and function model is proposed. The holistic model consisted of 3 sub-model such as 4-dimension continuum model for structure and function of ecosystem concerning hydraulic condition, the hydrological regime and ecological process coupling model, the diversity of biocenose and heterogeneity of geomorphology landscape coupling model. The relationship between ecological process and main habitat factors including hydraulic condition, hydrological regime and geomorphology landscape is established. The holistic model generalizes the major traits of the river ecosystem. In addition to natural factors, the holistic model also takes the impact of hydraulic engineering into account.

**Key words:** river; structure of ecosystem; function model; holistic model; flow condition; hydrological regime; geomorphology landscape