

# 河流不连续体概念及其在河流生态系统研究中的发展现状

张水龙<sup>1,2</sup>, 冯 平<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300191)

**摘要:** 系统地回顾了序列不连续体概念(SDC)产生与发展的过程以及应用的情况。河流连续体概念对SDC的产生及其最初的形式有着重要的影响。序列不连续体概念的发展经历了最初的形式和扩展形式。利用SDC的扩展形式可以在整个河道内预测由于河流调节所产生的各种不连续生态效应。作为模拟和分析河流再调节计划的理论基础,SDC可以为制订流域新的项目规划以及河流系统整治工作提供指导作用。

**关 键 词:** 河流生态学; 河流连续体概念; 序列不连续体概念; 河流生态系统; 恢复

中图分类号: TV211.2; G353.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2005)05-0758-05

河流的人为调节可能会减小河流流量变化的幅度,使河川径流趋于均匀,也会诱发水温变化,改变河流物质的传输以及河流系统主要的生物物理格局,从许多方面造成河流生态系统的退化。从河流生态系统的结构来看,作为河流调节的结果,上下游之间、水体和洪泛平原之间的空间关系被人为改变<sup>[1,2]</sup>。另外,从河流生态系统的功能来看,生态系统中各种非生物成分之间的某些物理相互作用丧失了,这种丧失又导致了系统内其它成分之间的潜在相互作用的丧失,如种群动力学和生物地球化学循环等<sup>[3,4]</sup>。因此,这部分结构、功能的恢复就成为河流生态系统恢复研究的主要内容。在这里,恢复可被理解为“使某一地的状况回到与发生改变前相似的状态,包括抗干扰的功能和有关的物理、化学和生物特征。恢复的目标是在它所在的景观内建立一个自我调整、完整的地点,而不是重新建立一种与原来完全不同的状况。”<sup>[5]</sup>。河流生态系统的复杂性,使河流生态系统的恢复研究充满了挑战性<sup>[6,7]</sup>。

概念和模式在河流生态系统的恢复中一直起着重要的作用。自1980年后,在河流生态学范畴内,相继提出了一系列的概念和理论,诸如河流连续体概念(River Continuum Concept)<sup>[8]</sup>、资源螺旋概念(Resource Spiralling Concept)<sup>[9]</sup>、序列不连续体概念(Serial Discontinuity Concept)<sup>[15]</sup>、河流水力概念(Stream Hydraulics Concept)<sup>[10]</sup>、洪水脉动概念(Flood Pulse Concept)<sup>[11]</sup>、河流生产力概念(Riverine Productivity Concept)<sup>[12]</sup>、流域等级概念(Catchment Hierarchy Concept)<sup>[13]</sup>等,这些为河流生态系统的恢复提供了有用的模式。这些概念分别对应于不同的河流类型,各自拥有一定的应用范围。其中河流连续体概念针对的是自然的未受干扰的河流,序列不连续体概念则侧重于人为干扰,针对的是拦蓄的河流或洪泛平原河流,实际上,它们既相互重叠,又相互补充。随着人们对水坝导致的河流系统的各种生物物理反应的重视,序列不连续体概念愈来愈受关注,甚至被作为河流管理的一个模式。在我国,随着拦河堤坝的不断兴建,河流的自然流动将受到更多的干扰和人为调节,这有可能带来河流生态系统的退变,相应的研究工作也日益受到关注。本文系统地回顾了国外序列不连续体概念(SDC)产生与发展的过程以及应用的情况,希望为我国该领域将来的研究工作提供一些理论帮助。

收稿日期: 2004-04-15; 修订日期: 2004-07-19

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040056060); 中国博士后科学基金资助(2004035516); 天津市高等学校科技发展基金资助项目(20031215)

作者简介: 张水龙(1970-),男,山西洪洞人,副教授,天津大学博士后,主要从事河流生态研究。

E-mail: zhangshuilong071@eyou.com

## 1 河流连续体概念

河流连续体概念(River Continuum Concept, RCC)<sup>[8]</sup>是以北美自然未受扰动的河流生态系统的研究结果为依据发展而来。尽管如此, 它仍是河流生态学中最重要的概念, 代表着河流生态学取得的重大进步。其重要性表现在: 首先, 它第一次试图沿着河流的整个长度来描述各种河流群落的结构和功能特征。第二, 明确地提出河流生态系统纵向的梯度规律, 认为河流群落能够改变自己的结构和功能特征, 使之适应非生物环境, 非生物环境从源头到河口呈现一种连续的梯度。第三, 在一定程度上影响了其后一批河流概念包括下面要谈到的序列不连续体概念, 连续性日益受到人们的注意。河流连续体概念的核心—连续梯度, 可通过有机质和大型无脊椎动物的功能摄食群的分布来表现, 其核心内容可概括如下:

生产力与水生群落的呼吸作用之比( $P/R$ )及有机质尺寸沿河流纵向的变化。河流的源头受河岸带植被的强烈影响。生产力与水生群落的呼吸作用之比较小( $P/R < 1$ )。有机质的颗粒相当大, 主要由枯叶和木质的残余物组成(粗颗粒有机质(CPOM)  $> 1\text{ mm}$ )。随着观察向下游的移动河岸带的影响逐渐减小。但是, 初级生产力和来自上游的有机质的量却在增加。 $P/R$ 的比率逐渐增加(从 $P/R < 1$ 到 $P/R > 1$ )。有机质尺寸逐渐减小, 大多为微颗粒的有机质(FPOM,  $50\sim 1\text{ mm}$ )以及超微颗粒的有机质(UPOM,  $0.5\sim 50\mu\text{m}$ )。对大河流来讲, 主要是从上游接受有机质, 由于长距离的加工使得这些有机质到了下游已经变得非常小了。初级生产力常常受深度和浊度的限制。 $P/R$ 比率再一次减少( $P/R < 1$ )。

无脊椎功能摄食群的分布沿河流纵向的变化。在河流的源头, 粉碎者同收集者一样重要。粉碎者利用枯叶及相关的生物质来制造粗颗粒有机物质(CPOM)。收集者则通过从水中过滤或者从沉积的细颗粒有机物质(FPOM)和特细粒状有机物质(UPOM)中收集来获得它们的食物。这些食物都已经被粉碎者进行了加工。在河流的中游, 收集者和食草者同为主宰。在更低的河段, 无脊椎动物则主要由收集者组成。

RCC概念自提出后, 其性能已在许多河流系统上进行了检验。野外观测的结果有与RCC一致的, 也有不一致的, 并由此引起了更深刻的讨论。但无论如何, RCC概念的提出, 为理解河流生态学提供了一个非常有用的框架。RCC概念的目的<sup>[14]</sup>必须得到正确认识, 作为自然正常系统的标准, 它所描述的基本条件和相互关系可被用于研究和比较现有的河流, 为河流生态学研究提供了有效的方法。

## 2 河流不连续体概念的最初形式

事实上, 随着人类对自然界干扰能力的加强, 人们经常遇到与RCC描述的河流系统不同的情形, 即许多河流在上游开始建设拦河蓄水大坝, 河流的径流量在很大程度上被这些大坝所控制。同大坝上游未整治河流相比, 下游的流量、温度、基流变化以及值得注意的一些其它变量, 在生物模式中都发生了重要的变化。对这一类现象的研究, 导致了序列不连续体概念(Serial Discontinuity Concept, SDC)的产生。序列不连续体概念的目的在于解释大坝对河流生态系统结构和功能所产生的相关效应, 并作出预测。在SDC最初的形式中<sup>[15, 16]</sup>, 把大坝看作最典型的干扰事物, 认为大坝是造成河流连续体分裂并引起非生物和生物参数与过程在河流上游—下游之间变化的不连续体, 通过定义“不连续体距离”和“参数强度”两个变量, 来预测各种生物物理的反应。其中“不连续体距离”是指作为水坝所导致的不连续的结果, 物理或生物变量的期望值沿上游或下游方向发生变化的距离。“参数强度”是指作为河流调节的结果, 变量发生的绝对变化, 常用偏离自然的或参照状况的程度来表示。

同RCC概念相比, 河流不连续体概念(SDC)在河流生态学的理解方面是既有继承又有发展, 主要表现在: 首先, 它强调了人为干扰(如大坝等)对河流系统的影响, 比较真实地反映了客观现象。其次, 它继承了RCC概念的某些思想, 同时又有所发展。例如它也认为河流拥有从源头到海洋的纵向的源梯度, 河流的生物物理属性沿着连续体发生可预测的变化, 这种变化依赖于生物群落、水坝在纵向方向上的位置以及水坝运行的模

式。第三,揭示了水坝存在的前提下河流生态系统的一些变化规律。一般来说,水坝增加了两个不连续体之间的变量的均一性<sup>[17]</sup>。例如,在水库的滞水中,温度比流水中的分布更一致。此外,大坝的修筑削弱了主河流和河岸带之间的生态连续性,从大的方面来看表现在两点,首先反映在大坝修筑后大的有机质颗粒的运输(如 CPOM)将被阻塞,相反小颗粒(FPOM)的则可以很容易地通过大坝,这种对来源于河岸带植被的 CPOM 的阻塞割裂了上游外源有机质输入和下游有机质加工之间的联系。其次,大坝等水工建筑物的存在经常使河道同它们的洪泛平原以及河岸带森林相隔离。

### 3 河流不连续体概念(SDC)的扩展形式

无论是河流连续体还是序列不连续体概念最初的形式,都着重于河流沿纵向的变化,而忽视了与洪泛平原河流有关的横向和垂直的范围及功能。1980 年对连续洪水的 hypotheic 特征研究,证明了这些概念存在的缺陷,并导致和支持了洪水脉动概念(flood pulse concept, FPC)的建立<sup>[11]</sup>。与其说 FPC 的提出是对 RCC 研究的冲击,倒不如说它完善了早期应用 RCC 理论预测的河流生态系统过程。这一变化也直接影响了序列不连续体概念,使之认识到并考虑横向和垂直的连续以及河岸生态交错带在河流生态学中的功能重要性<sup>[18]</sup>。

基于对洪泛平原河流研究结果的认识,即同自然的河流流态相比,流量调节和河道护岸改变了河道和洪泛平原之间的水分和物质交换,SDC 由最初的纵向连续进一步扩展为包括横向和垂直的连续<sup>[17]</sup>,同时引入了新的概念<sup>[18]</sup>即横向的、垂向的和纵向的参数相对强度。SDC 的扩展形式对纵向、横向和垂向的生态相对重要性作出了比较合理的解释,并以自然河流中的情形<sup>[19]</sup>为基础,总结了双向通道的强度在河流纵向上的变化。在发育受限制的河流上游,纵向的连续应是最重要的;在狭长的河流中游,垂直方向的影响应比较突出;在山前平原和沿海平原通常为蜿蜒状的河流下游,横向的影响应是最复杂的。利用 SDC 的扩展形式可以预测由于河流调节这些多向通道所发生的变化,为河流规划以及河流系统的整治工作提供指导作用。

### 4 SDC 的研究现状与应用

目前,关于 SDC 的研究可以简单地划分为两类,一类是从不同角度开展的零碎研究,另一类是选择特定河段,通过收集多年的主要变量数据,以 SDC 为指导原则进行的研究。后一类研究从以下方面在不同程度上支持或应验了 SDC 的理论:

(1) 大多数的研究结果都证明,在那些受到调节的河流中,温度和物种的丰富性等主要变量在水坝下游随着距离的增加发生了变化,并且依据水坝上游的参照状况或未调节的支流,发生这些变化的距离和变动的范围是能够预测的。不连续体距离和河流调节对河流生物地理化学影响的强度在不同的河流之间是不同的。

(2) 在科罗拉多河的 Grand Canyon 河段,多次利用水库泄水创造洪水进行这方面的研究<sup>[20]</sup>。从该河段河流调节所产生的效应(即不连续体距离和参数强度改变了)来看,结果是肯定的。在 Green River(美国科罗拉多河的一条重要支流)进行的研究<sup>[21]</sup>,再一次检验了 SDC 理论的正确性。同时,该研究也指出 SDC 在精确地度量微妙的反应方面存在的不足。事实上,还没有其它的河流理论被证明具有同 SDC 一样的说服力。

(3) 正如 SDC 预测的那样,对于高度调节的河流,如果不拆除部分或全部大坝来保证自然的或至少正常的流量,简直就不可能恢复任何近似自然的状况,即使系统得到恢复,也可能在很大程度上偏离原始的或参照的状况<sup>[1]</sup>。这表明,河流自然形态及其属性的人为改变是要慎重的。

(4) 在南非 Buffalo River<sup>[22,23]</sup>的研究显示,因为调整规划的强度,营养的丰富,淹没了河流随向下游距离增加恢复的自然趋势,以致 SDC 的许多预测不能被证实。在西班牙 Rio Duration<sup>[24]</sup>的研究显示,在大坝的下游可以观察到 SDC 预测的状况,但是,在河流下游的部分地区,恢复被工业污染彻底地淹没,否则,在这些区域重新安置应该被证实。这些研究证明了 SDC 对河流调节所产生的这些影响的总和也是可以预测的,除非河流调节的影响彻底改变了被调整的河流系统的自然属性。

(5) 事实上,造成河流不连续的原因包括自然的和人为的两方面,而人为活动中除了大坝等水工建筑物以

外, 还有其它类型的人为活动形式。对于河流水系内附加在自然的或其它人为活动之上的不连续, Sabater 等<sup>[25]</sup>运用空间统计方法对由于河流调节引发的不连续效应也进行了研究。

以上这些研究大都集中在河流的纵向变化上, 即 SDC 的最初形式。有针对性地应用 SDC 的扩展形式, 沿整个河流检验横向和垂向不连续性的研究还很少。因此, 下一步应继续完善 SDC 的扩展形式, 发展更好的 SDC 经验模型, 以及通过整个河流的再调节使它们生效。同国际上的这种研究趋势相比, 国内该方面的研究还处于一个探索和融合的阶段。近年来不少学者开始在生态水文学<sup>[26]</sup>、河流生态学<sup>[27]</sup>、河流治理等不同的研究领域引入河流连续体概念和河流不连续体概念的介绍。唐涛等<sup>[28]</sup>以香溪河主要初级生产者——附石藻类为例, 对河流连续体的相关概念和理论进行了验证。结果表明香溪河是一条以自养生产为主的河流, 所研究的特征并不完全与连续体概念的预测相一致, 认为河流已经受到了一定程度的人为干扰。此外, 围绕葛州坝和三峡等大型水利工程对河流生态系统所产生的影响, 从水文、生态、水利工程、生物、地理等不同的角度开展了相关研究, 积累了一定的研究事实。这些都为进一步系统地开展河流不连续体的长期研究奠定了基础。

## 5 结 语

综上所述, 经过 20 多年的发展, 河流不连续体概念(SDC)的理论和方法正日趋完善, 该领域的研究成果也在不断的丰富着河流生态学, 尤其是受调节河流的生态研究的理论体系。当前, 河流调节产生的最大问题是河流生态系统多向通道的破碎化和恶化, 且愈来愈受关注, 加强对这些通道的研究, 有利于模拟任何受调节河流恢复自然形态的情景, SDC 可作为模拟和分析河流再调节规划的指导性理论。但就我国情况来看, 一方面由于各种调节措施的广泛实施, 致使我国大多数河流生态系统受损或退化的情况加剧, 急需得到恢复; 另一方面又由于种种原因, 目前受调节河流的生态学研究在许多方面仍然比较落后。特别是关于 SDC 的研究还很少, 应尽快加强这一领域的研究, 以促进河流生态系统的恢复。

### 参考文献:

- [1] Stanford J A, Ward J V, Liss W J, *et al.* A general protocol for restoration of regulated rivers[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1996, 12(4-5): 391- 413.
- [2] Nienhuis P H, Leuven R S E W, Ragas A M J. New concepts for Sustainable Management of River Basins[M]. Backhuys: Leiden, 1998.
- [3] Tockner K, Schiemer F, Baumgartner C, *et al.* The Danube restoration project: species diversity patterns across connectivity gradients in the floodplain system[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1999, 15(1-3): 245- 258.
- [4] Ward J V, Tockner K, Schiemer F. Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1999, 15(1-3): 125- 139.
- [5] Middleton B. Wetland Restoration, Flood Pulsing and Disturbance Dynamics[M]. New York: Wiley, 1999.
- [6] Bornette G, Amoros C, Piegay H, *et al.* Ecological complexity of wetlands within a river landscape[J]. *Biological Conservation*, 1998, 85: 35- 45.
- [7] Smits A J M, Nienhuis P H, Leuven R S E W. New Approaches to River Management[M]. Backhuys: Leiden, 2000.
- [8] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al.* The river continuum concept[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37: 130- 137.
- [9] Elwood J W, Newbold J D, O'Neil R V, *et al.* Resource spiraling: an operational paradigm for analyzing lotic ecosystems[A]. Fontaine T D, Bartell S M (eds). In *Dynamics of Lotic Ecosystems*[C]. Ann Arbor Science Publishers: Ann Arbor, MI, 1983. 3- 27.
- [10] Statzner B, Higler B. Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns[J]. *Freshwater Biology*, 1986, 16: 127- 139.
- [11] Junk W J, Bayley P B, Sparks R E. The flood pulse concept in river floodplain systems[J]. *Canadian Special Publications in Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 106: 110- 127.
- [12] Thorp J H, Delong M D. The riverine productivity model: an heuristic view of carbon sources and organic processing in large river ecosystems [J]. *Oikos*, 1994, 70: 305- 308.
- [13] Frissell C A, Liss W L, Warren C E, *et al.* A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context

- [ J]. *Environmental Management*, 1986, 10: 199– 214.
- [ 14] Minshall G W, Cummins K W, Petersen R C, *et al.* Developments in stream ecosystem theory[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1985, 42: 1045– 1055.
- [ 15] Ward J V, Stanford J A. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems[A]. Fontaine T D, Bartell S M (eds). In *Dynamics of Lotic Ecosystems*[C]. Ann Arbor Science Publishers: Ann Arbor, MI, 1983, 29– 42.
- [ 16] Ward W, Stanford J A. The intermediate disturbance hypothesis: An explanation for biotic diversity patterns in lotic ecosystems[A]. Fontaine T D, Bartell S M (eds). In *Dynamics of Lotic Ecosystems*[C]. Ann Arbor Science Publishers: Ann Arbor, MI, 1983, 347– 356.
- [ 17] Ward W, Stanford J A. The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers[J]. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1995, 10(2– 4): 159– 168.
- [ 18] Ward W. The four dimensional nature of lotic ecosystem[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8(1): 2– 8.
- [ 19] Stanford J A, Ward J V, Ellis B K. Ecology of the alluvial aquifers of the Flathead River, Montana[A]. Gibert J, Danielopol D L, Stanford J A (eds). In *Groundwater Ecology*[C]. San Diego: Academic Press, 1994. 367– 390.
- [ 20] Webb R H, Schmid J C, Marzolf G R, *et al.* The Controlled Flood in the Grand Canyon[A]. *Geophysical Monograph* 110[C]. Washington, DC: American Geophysical Union, 1999.
- [ 21] Vinson M. Long term dynamics of an invertebrate assemblage downstream from a large dam[J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(3): 711– 730.
- [ 22] Palmer R W, O' Keefe J H. Downstream effects of impoundments on the water chemistry of the Buffalo River ( Eastern Cape), South Africa [ J]. *Hydrobiologia*, 1990, 202: 71– 83.
- [ 23] O' Keefe J H, Palmer R W, Byren B A, *et al.* The effects of impoundments on the physicochemistry of two contrasting southern African river systems[J]. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1990, 5: 97– 110.
- [ 24] Camargo J A. Macroinvertebrate responses along the recovery gradient of a regulated river (Spain) receiving an industrial effluent[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 1992, 23: 324– 332.
- [ 25] Sabater F, Amengol J, Sabater S. Measuring discontinuities in the Ter River[J]. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1989, 3: 133– 142.
- [ 26] 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.
- [ 27] 蔡庆华, 唐 涛, 刘建康. 河流生态学研究中的几个热点问题[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1573– 1577.
- [ 28] 唐 涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 141– 144.

## Serial discontinuity concept and its development status in river ecosystem research<sup>\*</sup>

ZHANG Shuiling<sup>1,2</sup>, FENG Ping<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Environmental

Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** The paper systematically reviews the development of the serial discontinuity concept (SDC) and its application. The river continuum concept influences the development of the SDC and its original form. The SDC evolves into two kinds of forms, the original form and the extending one. With its extending form the discontinuity in whole river corridor caused by river regulation can be predicted. As the theoretical base of modeling and analyzing the river re-regulating planning, the SDC can provide guideline for the new project programs of watersheds and the restoration of the regulated rivers. However, there are a few research works about the serial discontinuity concept in China. It is suggested to strengthen the research of this field in order to improve the restoration of river ecosystem.

**Key words:** river ecology; the river continuum concept; the serial discontinuity concept; river ecosystem; restoration

<sup>\*</sup> The study is financially supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(No. 20040056060) and China Postdoctoral Science Foundation(No. 20040355516).