

DOI: 10.5846/stxb201410152028

杨海乐, 陈家宽. 流域生态学的发展困境——来自河流景观的启示. 生态学报, 2016, 36(10): - .

Yang H L, Chen J K. Watershed ecology in a dilemma: inspiration from riverine landscape analysis. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): - .

流域生态学的发展困境 ——来自河流景观的启示

杨海乐¹, 陈家宽^{1, 2, *}

¹ 复旦大学生物多样性科学研究所, 上海 200438

² 南昌大学生命科学研究院流域生态研究所, 南昌 330031

摘要: 随着中国生态环境问题越来越多地呈现出流域特性, 流域生态研究的重要性和紧迫性也日渐凸显。整合流域生态研究, 形成一个有效的研究体系, 流域生态学迄今未能予以实现。通过对“流域生态学”和“河流景观”这两个相近概念提出过程的比较研究, 探讨流域生态学发展困境产生的原因, 为流域生态研究体系的构建提供思路。分析结果显示流域生态学目前主要存在两个不足: 1) 因为提出流域生态学概念的关键现实需求不明确, 导致难以确定其核心科学问题; 2) 因为没有相应的流域生态系统概念模型, 进而也就难以带动相关研究落实跟进。要推进流域生态学的发展, 第一步要做的就是明确流域生态研究体系构建的核心现实需求, 并对流域生态系统进行一个概念模型上的相应设计。

关键词: 流域生态学; 河流景观; 流域

Watershed ecology in a dilemma: inspiration from riverine landscape analysis

YANG Haile¹, CHEN Jiakuan^{1, 2, *}

¹ Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200438, China

² Center for Watershed Ecology, Institute of Life Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China

Abstract: Watershed ecology is of great importance in China because most ecological and environmental problems occur at a basin-wide scale. However, studies on watershed ecology have not yet synthesized into a unitary framework. The factors causing this dilemma in watershed ecology research are not clear; therefore, it has been difficult to precisely determine how to solve this problem. We hypothesized that this dilemma is rooted in structural defects underlying the concept of watershed ecology. By comparing the concepts of watershed ecology and riverscape, we tried to identify missing links in the formation and development of watershed ecology. The defects of watershed ecology are discussed mainly based on two original papers, “Watershed ecology (in Chinese)”, published in *Science & Technology Review* in 1997 by Cai *et al.*, and “Riverine landscapes: biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation”, published in *Biological Conservation* in 1998 by Ward, which proposed the concepts of watershed ecology and riverine landscape, respectively. Our review showed that there have been two main defects in the conception and development of watershed ecology. First, there was no clear definition of watershed ecology when the concept was proposed, and there was no identification of core scientific questions. Second, there was no ecosystem model developed at the watershed scale to guide follow-up research on watershed ecology. We suggest defining watershed ecology as an integrative sub-discipline of ecology that is focused on solving complex eco-environmental problems at the watershed scale. A conceptual model describing the spatial heterogeneity and eco-processes of a watershed ecosystem is necessary for building a solid framework of watershed ecology.

收稿日期: 2014-10-15; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jkchen@fudan.edu.cn

Key Words: watershed ecology; riverscape; drainage basin

随着中国生态环境问题呈现出越来越强的流域性特征^[1],政府和公众对流域生态研究越来越重视和关注,尤其是在生态文明建设和长江经济带建设的发展背景下。虽然流域生态研究蓬勃开展,但多散布在各传统学科的边缘,不成体系。1997年提出的流域生态学^[2]力图整合相关研究而形成体系,但因为种种原因并没有得到理想的发展^[3]。通过与河流景观的提出和发展的对比,本文发现流域生态学目前尚存在两个不足:1)因为提出流域生态学概念的核心现实需求不明确,导致其核心科学问题难以确定;2)因为没有相应的流域生态系统概念模型,进而导致难以带动相关研究落实跟进。而这两个不足是流域生态学发展绕不开的问题,因此建议将弥补这两个缺陷作为推进流域生态学发展的最紧要的工作来做。

1 研究背景及研究方法

回顾近现代科技发展史,流域研究至少可追溯到1915年犹他州的流域性水土流失对比实验^[4],而典型的流域生态研究也至少可追溯到1939年D.S. Rawson对流域与水体营养盐之间关系的研究^[5-6]。在国内,水土保持工作也于1933年开始^[7],1980年代初提出山-江-湖模型^[8-9],同时湖泊富营养化治理也开始投向流域层面^[10],1991年饶正富将社会-经济-自然复合生态系统概念^[11]引入流域,提出具有复合特征的流域生态系统概念^[12]。从最早的流域研究到现在,数十年来,研究方向逐渐多样,各方向也都获得不同程度的发展,但也都是散布于各相关传统学科——诸如地理学、地貌学、水文学、地球化学、生态学、经济学、管理学,各自为战。

1997年,蔡庆华等从淡水生态学家的视角出发,为克服传统淡水生态学只关注水体的局限性,针对淡水生态系统向流域尺度拓展而提出流域生态学(watershed ecology)概念^[2]，“但由于多方面的限制,使得这个看似很有生命力的学科仅仅停留在概念探讨上,或者退化成研究‘流域内的生态学’问题”^[3]。换句话讲,也就是说流域生态学概念的提出并没有为流域生态的相关研究提供框架性的指导,并没有将纷繁多样的流域生态相关研究组织整合起来形成一个体系,流域生态学还只是个概念,流域生态相关研究也还沿着各自的轨迹发展。为什么会产生这样一个困境?怎么摆脱这样一个困境?这个问题的提出,应该并非肇始于本文,但如何解答这个问题,尚未有学者认真深入地对其进行讨论。回答这个问题有两种路径:1)全面梳理相关文献,从自身发展中找问题解决问题,2)找具有一定可比性的领域,从对比中找差距弥补差距。

前一条路径最常用也最易为人理解,通过全面的文献梳理能够尽可能全面地列出存在的问题,但同时也存在两个困难:1)文献庞杂,易发生疏漏;2)问题零碎,易浮于表面,进而也就导致操作繁难,容易抓不住关键问题。第二条路径相对简易,通过对比可以比较方便地找到发展过程和内在结构中的缺陷,但存在两个前提条件:1)存在一个具有可比性且发展较好的研究方向;2)对方的成功经验对于本研究方向具有可借鉴性。鉴于第一条路径较难操作且难达成,同时很幸运地找到了一个发展比较好且具有可比性的研究方向——河流景观,所以选择第二条路径。河流景观(riverine landscape, riverscape)是J.V. Ward于1998年为解决传统河流生态学只关注河道的局限性,针对要超越河道将整个河流系统作为一个整体而提出的重要概念^[13],此概念的提出在学界引起不小的反响与讨论,在之后的研究实践过程中也有积极的发展^[14]。

整体来看,流域生态学和河流景观这两个概念都是从淡水生态学出发,通过空间尺度的拓展以寻求对研究对象更为全面的理解把握,但两个概念的侧重点不同。假设侧重点的不同是适应各自实际需求的表现,而不是造成发展困境的因素,同时假设河流景观的发展经验是可借鉴的,那么比较其提出与发展过程中的内在差异就能够找出产生困境的关键原因,并且通过弥补不足就能够在一定程度上解决关键问题,因为提出与发展过程中的形式和逻辑上的不足,反映到结果中就是结构上的缺陷。需要说明的是,此处所说的内在差异不是指研究内容上的差异,而是指提出与发展逻辑上的差异。当然,这里边还有一个内含假设,即在比较中我们是能够辨识出哪些是好的。假设概念提出时的核心设想对其后续发展具有最大影响,那么以提出流域生态学和河流景观概念的两篇核心文献(蔡庆华等,1997;J.V. Ward,1998)为主,以相关文献为辅,对比分析其论证

的形式和逻辑,就能够找出流域生态学内在结构上的缺陷。虽然流域生态学和河流景观的角色定位上有所不同,一个是分支学科,一个是研究方向,但这种不同暗示的也只是流域生态学顺利发展所需的必要要素要比河流景观所需的要多一些。但在添补上那些应该多的什么之前,至少得先补齐其不足。整体来讲,尽管前置假设有可能导致所得结论有一定的局限性,但这种对比分析对于流域生态学进一步发展的探讨来说应该还是有所裨益。

为了读者的便利,谨将结论和观点先置于此,具体阐述论证由下文展开。对比分析的结果显示流域生态学在提出的过程中有两个缺陷,并且在之后的探讨与发展中也未予以补齐。一个缺陷是没有明确为什么要提出流域生态学概念,其核心现实需求是什么,进而也就没有确定其核心科学问题,虽然文中提出的社会需求和研究内容也挺多,在之后的探讨中列出的更多^[15];另一个缺陷是没有给出一个相应的流域生态系统(文中称之为流域景观系统)的概念模型,进而也就难以带动相关研究落实跟进,虽然学界实际上做了很多流域生态的研究,但并不在流域生态学的体系之内,因为流域生态学尚未形成体系。这里有一个假设,即我们认为流域生态学的提出不是来圈地的,不是将目前已有的流域生态研究划归到自己的学科范围就完事的,而是要形成一个相应的体系。因此,要推进流域生态学的发展就需要补齐缺陷,理顺逻辑。我们的意见是:1)将流域生态学的目标定位明确为,整合地集成地应对交织出现的流域问题;2)明确流域问题的关键是以流域水循环为核心和驱动的流域过程;3)构建一个能够有效描述流域生态系统——这个具有空间异质性且近似封闭的集合生态系统——的概念模型来抓住流域过程;4)在流域生态系统概念模型指导之下建立相应的研究体系。这也就意味着流域生态学不再是把研究领域从水生生态系统向陆地生态系统延伸的淡水生态学,而是在流域框架下的生态系统生态学和景观生态学的融合。当然,在此要注意区分“流域内的生态学”、“流域尺度的生态学”和“流域生态学”。

2 流域生态学与河流景观概念的提出与发展简述

2.1 流域生态学概念的提出与发展

流域生态学这个概念是在 20 世纪中国日益关注流域层面生态问题的大背景下提出的。在我国,流域生态问题从 20 世纪早期就已有关注^[7],到世纪末已经成为一个重点。其中 80 年代“山-江-湖”模型的提出是一个里程碑^[8-9],对后来的流域生态问题探讨产生了深远影响^[16]。因植被破坏、围垦过度、洪水频发,植被恢复、退耕还林、退田还湖成为那个时代关注的主题^[17-19],尤其是在 1998 年长江流域大洪水之后,对其讨论更成为一个迭起的高潮^[20-22],与之同时流域内生物多样性也逐渐受到关注^[23-25],随后对流域生态系统的认识也逐渐引起注意^[26-28]。

1997 年蔡庆华等在《科技导报》上发表“流域生态学——水生生态系统多样性研究和保护的一个新途径”一文,以一个淡水生态学家的视角从淡水生态学、生物多样性等着眼点出发提出了流域生态学这个概念,并将其定义为“以流域为研究单元,应用等级嵌块动态理论,研究流域内高地、沿岸带、水体间的信息、能量、物质变动规律”的学科^[2]。随后邓红兵等通过与相关学科——如水文学、湖沼学、生态系统生态学、景观生态学、水土保持与流域管理等关联,对当时已有理论——如社会-经济-自然复合生态系统理论、等级系统理论、河流连续统理论、生态交错带理论、生物多样性、可持续发展理论等的吸收,推进对流域生态学的思考^[15],但这也只是相关资源的搜罗和潜在可能性的探索,还远没成为体系。此时,对流域生态学的认识开始从以淡水生态系统为核心向完整的流域生态系统拓展^[15]。之后,曾有学者试图推动流域生态学内涵的进一步发展,但有心无力^[29],甚至有将流域生态学狭隘化为水文生态学之流域分支的危机^[30]。

流域生态学(蔡庆华等, 1997)的引证文献统计(资源库是中国知网):一级引用 83 次,二级引用 1666 次。河流景观(J.V. Ward, 1998)的引证文献统计(资源库是 Web of Science 核心集):一级引用 309 次,二级引用 8740 次。文献引用状况及趋势在一定程度上反映了文献本身及其所倡导的研究体系在学界的发展活力。

关键词为“流域生态学”的文献统计(资源库是中国知网-期刊),共 56 篇。关键词为“河流景观”的文献

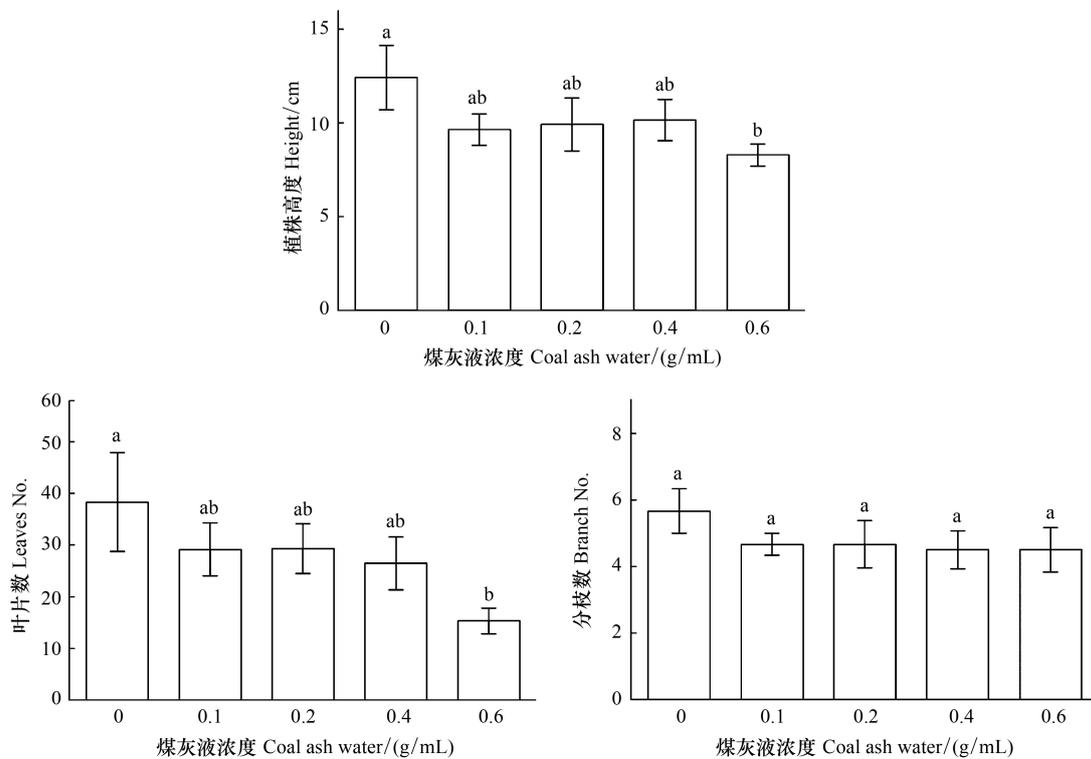


图1 引证频次统计(2014.12.10)

Fig.1 Citations in each year (2014.12.10)

统计(资源库是 Web of Science 核心集),共 270 篇。一个主题 的文献数量一定程度上反映了在该领域的研究群体及研究能力的大小。2001 年举行了第一次河流景观国际会议,河流景观文献数量随即在 2002 年发生跃变。

2.2 河流景观概念的提出与发展

河流景观这个概念是在 20 世纪欧洲和北美关注并推进河流生态重建的大背景下提出的。由于人类活动对河流的干扰改变了其自然形态^[31],并严重威胁其生物多样性^[32],到 20 世纪 80 年代,在欧洲和北美对河流景观的恢复重建已经逐渐受到关注并开始陆续推进^[33-34],到 90 年代,其重心逐渐从审美景观规划转向对淡水生物多样性的保护^[35-36],进而淡水生物多样性的格局、形成、维持等科学问题也日益受到关注^[37-38]。

1998 年 J.V. Ward 在 *Biological Conservation* 上发表“Riverine Landscapes: Biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation”一文,以一个河流生态学家的视角从生态系统管理的角度出发提出河流景观概念,其超越传统河流生态学只关注河道的局限,而将整个河流系统作为一个整体,以流水地貌为依托,关注生物与环境相互作用的模式和过程在四维时空(纵向、横向、垂向、时间向)中的展开^[13]。河流景观,粗看即河道与高地之间的生态过渡带,细看则是不同类型不同大小的生境、微生境的多样性斑块组合^[39]。随后,通过对生物多样性阐释的拓宽,河流生物多样性的四维时空论述被融合进全新的阐释中,从结构多样性、功能多样性、物种多样性三个方面来理解河流生物多样性,进一步发展河流景观概念^[40]。2001 年第一次河流景观国际会议通过不同学科的参与^[41],大力推动了对河流景观的理解和研究^[42-45]。之后,有关河流景观的探讨不断推进^[46-47],相关的研究也不断展开^[48-49]。随着河流生态学与景观生态学、河流地貌学的深度融合,河流景观已经成为淡水生态学的一个重要发展方向,同时也为淡水生态系统生物多样性保护、生态重建等提供了有力支撑。

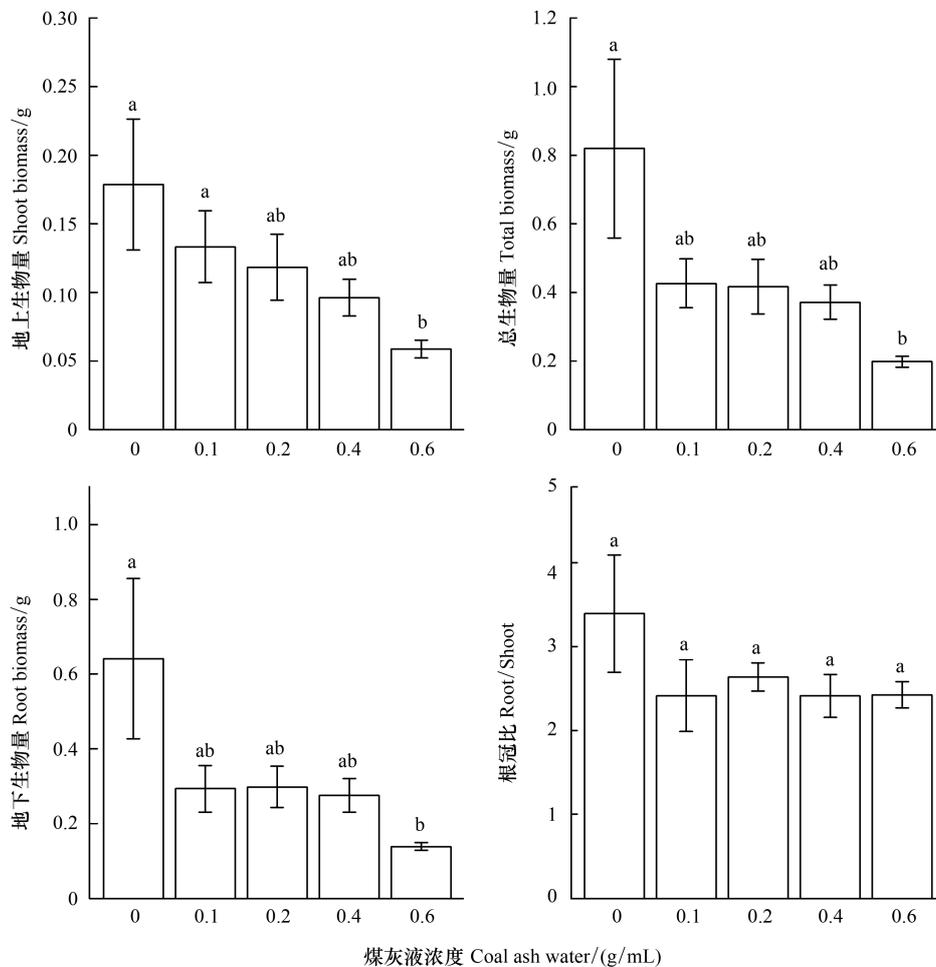


图 2 每个主题的文献逐年统计 (2014.12.10)

Fig.2 Published items of each topic in each year (2014.12.10)

3 流域生态学与河流景观概念提出的对比分析

整体来讲,流域生态学和河流景观两个概念的提出,都是在 20 世纪 90 年代末,都受到景观生态学快速发展的影响,都面对日益严峻的淡水生物多样性危机,都以淡水生态学家的视角出发,也都着眼于对传统淡水生态学只关注水体的超越,但侧重点不同。这其中的“同”反映了两个概念的可比性,而“不同”则暗示着两个概念的比较不是为了寻求哪个更好,用一个替代另一个。当然,本文的目的本就不是为了比较其优劣,也不是为了厘清两者之间的差异,而是希望通过对比分析找流域生态学在提出过程中的内在不足。以下针对提出流域生态学和河流景观这两个概念的两篇论文(蔡庆华等,1997;J.V. Ward,1998),从 6 个方面比较分析其论断逻辑和功能建构的差异。

1) 都认识到淡水生态系统不只是河道,而是一系列的景观类型的组合,但却给予了不同的处理。蔡庆华等从内陆湿地景观入手,指出“各种内陆湿地景观都包含了一系列的不同类型的湿地环境,构成一个复合生态系统……不同类型湿地环境镶嵌分布,而且任何一种类型的湿地都与其它类型具有多方面的联系”;Ward 则从河流系统入手,指出“河道只是一系列相互关联的群落生境与环境梯度中的一部分……如果没被改变,河流系统具有在一系列时空尺度中多重相互作用的通道……包括纵向的资源梯度、泛滥平原的动态、与地下水的相互作用以及干扰模式”。但蔡庆华等对湿地生态系统一体化的阐述并没有给流域生态学概念的建构提供直接的理论支持;而 Ward 对河流系统的认识则在河流景观概念的建构中起了支撑性作用。

2) 都发现人们对淡水生态系统的误解导致了人类活动对淡水生态系统的严重破坏,但却给予了不同的对待。蔡庆华等从湿地生态系统一体化的角度指出“由于对湿地环境结构的完整对于生态系统的重要性认识不足,就随意建造人工设施破坏环境结构,如长江中下游泛滥平原的许多水工建筑就使当地江湖一体的环境结构濒临解体”,因而需要研究湿地环境的结构特性、连接方式等,以指导“保护和恢复湿地多样化的环境结构”;Ward以河流景观的角度也认为“人类干扰,比如径流调节、河道渠化、河岸固化打乱了自然的干扰模式、截断了环境梯度、切断了河流的相互作用(消除了上下游联系、隔断了河道与河岸/泛滥平原以及地下含水层),进而妨碍了正常的演替轨迹、生态多样化、迁徙途径以及其它的过程”,因而需要建立一个可靠的并对自然的河流生态系统有一个整体的理解的理论基础,以指导其环境梯度的重建、相互作用途径的重连、类似自然动态的重构。但蔡庆华等对湿地所面临问题的认识并没有能够给流域生态学概念的建构提供明确的需求指导;而Ward对河流生态系统所面临问题的分析在河流景观概念的建构中已经成为其发展的向标。

3) 由于生境结构的多样性是淡水生态系统生物多样性的基础,因此面对淡水生态系统的退化、生物多样性的危机,都呼吁保护、恢复、重建淡水生态系统,以保护其生物多样性,但却有不同的论述用意。蔡庆华等从湿地类型多样化的角度提出要“研究栖息地环境结构多样化格局对于维持生物多样性的作用”,同时,强调“恢复湿地生物多样性的重点应在生物栖息环境的完整性和湿地食物网的结构完整性两个方面”;Ward从河流景观的角度出发,提出“河流是依赖于洪水的生态系统,并且泛滥平原是河流的一个组成部分”,因此需要“在一系列尺度上恢复其纵向、横向、垂向上的环境梯度,恢复不同景观要素直接的生态连接度,以及重构类似于自然的环境动态”。但蔡庆华等对湿地生态系统重建的判断和指导理念并没有能够给流域生态学概念的建构以发展的指引;而Ward对河流生态系统重建的需求分析已经成为河流景观基础研究的指引。

4) 景观生态学的成功对淡水生态学的发展有不小的震动,因而也都意识到了景观生态学所代表的发展方向,但却给予不同的判断。到二十世纪90年代,经过近半个世纪(尤其是八九十年代)的发展,景观生态学已经渐趋成熟。蔡庆华等的文中写道“现代生态学研究更是迫切地需要与数学、地学、计算机科学等融合,景观生态学就是相互融合的较好的例子”,表明了他们对景观生态学所代表的发展方向的理解,但以“景观生态学不易与淡水科学结合,因为水体常作为不透明的、异质的嵌块在景观地图上被描绘,并且水体科学家不常借用景观生态学的工具和概念解释它们”,“其原因在于淡水生态系统格局很难被看到”的原因而另辟蹊径,尽管其所谓的“不易”和“很难”并不能完全否定景观生态学与淡水生态学的结合的可能性;Ward则把景观生态学概念引入河流生态系统的研究,进而组成一个新的概念——河流景观,并且提出“从整体景观的角度来看,河流生境包括流动的和静止的水体、常年的和暂时的水体、湿地和地下水”。在流域生态学概念建构当中,景观生态学虽然名义上只是其外部刺激和参考,但在实际上还是主要的比照,比如说“研究流域内高地、沿岸带、水体间的信息、能量、物质变动规律”这个表述明显受到景观生态学斑块理论的影响,尽管文中试图划清景观生态学和流域生态学之间的界限,这种划清界限的想法在接下来的发展中得到了延续^[15];在河流景观概念的建构当中,景观生态学成为其明言不讳的理论指导,并且在根据河流系统自己的特征形成其自己的架构后还一直在努力和景观生态学更进一步融合^[50-51]。

5) 由于淡水生态系统处于陆地生态系统的包围之中,并且容易受到河岸地区的影响,进而也都意识到淡水生态系统的研究不能只关注水体,需要研究对象的拓展与超越,但却有不同的拓展尺度。蔡庆华等指出“淡水生境相对不连续,许多淡水物种的分布不易突破陆地的阻隔,这些阻隔将淡水系统分隔成不连续的单元”,并且还“易受岸上周边地区的影响,包括生命活动和自然过程”,进而“仅仅研究水体本身是不够的”;Ward提出“扰动和环境梯度相互协调导致了(河流)连接性和时空异质性之间的正反馈,而正是时空异质性支撑了其生物多样性”,而要恢复河流的时空异质性就必须从一个整体可持续的视角来理解,也就是说必须要“意识到泛滥平原和地下水都是河流的一个组成部分”。流域生态学概念建构,是将淡水生态学的研究对象从淡水生态系统扩展到整个流域;而河流景观概念建构,则只是从河道扩展到与其紧密联系的泛滥平原、地下含水层以及部分阶地和高地。在这里导致这个扩展尺度差异的,最重要的恐怕不是对“岸上周边地区”的

尺度理解差异,而是蔡庆华等的“实际应用的角度”——“水体占国土总面积的份额很低……而流域则大得多”。

6) 最后都提出了一个新的概念,但对新概念的认知程度却有所不同,进而对其目标定位清晰度也不同。流域生态学被阐释为“研究流域内高地、沿岸带、水体间的信息、能量、物质变动规律”,表述简单明了,但缺少进一步的模型论述,进而无法为下一步的主要研究内容做切实的骨架支撑;其主要研究内容被概括为八个方面——1) 流域形成的历史背景及发展过程,2) 流域景观系统的结构、功能和变化,3) 流域生物多样性测度,生态环境变化过程对流域景观格局的影响与响应,4) 流域内能量、物质循环关系及其规律及其动力学,5) 流域的生态学特征以及区域生态环境整治,6) 流域水系环境容量及污水治理与资源化,7) 水体梯级开发的生态后果与对策,灾害评估与预警,8) 流域社会经济可持续发展对策——很丰富,包括了从地质学到生态学到可持续发展、从基础研究到应用研究,但在某种程度上丰富同时也意味着模糊抓不住重点,再加上这些空降的研究内容缺少基础模型的支撑,进而难以落实,虽然之后有尝试建立流域生态学模型系统的努力,但由于有将流域生态学引向水文生态学之流域分支的危险而不尽人意^[30];“其近期目标是从中、大尺度上对我国内陆水体及水生生物资源保护与合理利用决策提供依据,为社会经济可持续发展作贡献”,显然流域生态学没有发挥相应功能更难以说实现该目标,而倒是其它相关学科在为该目标付出了不少的努力,尽管还不能让人满意;其自身定位是“淡水生态系统向陆地生态系统的一个拓展”,是“淡水生态学、系统生态学和景观生态学间的交叉学科”,而在之后的探讨中则一直在努力淡化其淡水生态学的出身^{[15, [29-30]]}。在 Ward 的文中河流景观“是指一个与流水系统相关的大尺度格局和过程的整体观点”,表述模糊,但之后通过将河流景观放入河流生境等级结构(hierarchical framework)^[52]、河流等级(stream order)系统^[53]、河流侵蚀-沉积地貌^[54]来讨论,以及将生物多样性套在河流景观四维结构模型^[55]上分析使得河流景观这个概念变得具体;对于其主要研究内容,文中并没有给出一个全面的布局,而只是将河流景观四维结构示范性地用在对生物多样性的讨论当中,并勾勒出一个河流景观在生物多样性方面的概念模型,而后的研究大都是以这个示范、这个概念模型为基础、模板或者源头而衍生展开的^[56-57];其目标定位是“作为一个坚实的概念基础”推进“自然河流生态系统的整体理解”,以支撑“生态系统管理”,进而促进“淡水生物多样性的保护和重建”,从其后的发展来讲,河流景观的四维时空结构在一定程度上正一步一步向这个目标迈进;对于其自身定位,虽然文中没有明确给出,但从其整体行文表述和构词上可以看出,河流景观是河流生态学和景观生态学的融合。

仔细分析上面几个主要论断分歧点,一方面可以找出其中被忽略的可能性,另一方面也可以看到更多的问题细节。找出问题细节和被忽略的可能性,应该会有助于下一步解决问题时的思路拓宽和逻辑论证。推敲流域生态学概念提出中的几个论断逻辑:1) 淡水生态系统“易受岸上周边地区的影响”,需要将研究尺度进行拓展,而这个最适宜的尺度或许是拓展至河岸带(riparian zone,或称岸边带,既包括河流的也包括湖泊的),因为在自然状态下影响淡水生态系统的陆地因素基本上主要集中在河岸带^[58-59],当然,在人类活动强烈的地区,影响淡水生态系统的区域要拓宽到河岸带以外^[60-61],并且主要影响源自人类活动区域^[62-63];2) “水体科学不易与景观生态学结合”,“水体科学家不常借用景观生态学的工具和概念解释它们”,然而“不易”只是尚未形成结合较好的体系,“不常”但毕竟还是有^[64],况且景观概念的应用本就不只限于陆地生境,也应同样适用于水生生境和过渡生境^[65],虽然景观生态学的许多案例来自于陆地生境^[66],因而这些理由对于证明淡水生态学与景观生态学格格不入是不充分的,河流景观概念模型的发展就是一个反证;3) 将淡水生态系统作为开放系统,进而提出要寻求一个更高层次以跳出其研究对象的局限,然而这个“层次”本身就很模糊也很随意;4) 水体面积小而流域面积大,这是淡水生态学尺度拓展到流域的实际应用需要和直接原因,但不难看出在这里这个尺度拓展的随意性。当然,此处对论断逻辑的反思并不是要论证流域尺度本身不重要,而恰恰相反,我们认为流域尺度对生态学的发展很重要,因为流域生态系统有确切的边界,对这个问题前人早有阐述^[5, 67]。

梳理对比这两个概念提出的逻辑推演过程,容易发现,对每个主要问题论述的组织方式在一定程度上决

定了对概念阐述的有效性,也就是说,如果对每个问题的论述都有明确的逻辑目的并且整体上能够逻辑清晰充分地支持概念内涵的建构,那么对概念的整体阐述就会比较有效,反之亦然。在上述6个对比项当中,蔡庆华等对前3个问题的讨论,以及上述对比中未曾提及的支撑“将多样性指数的测度对象由生物群落扩展到生态系统”的讨论,对于流域生态学概念的提出和阐述来说基本上是脱节的,尽管其中有一部分在整个学科话语当中是相关联的,在研究内容当中也给予了隐约的照应;而Ward对每个问题的论述最后都直接地参与了河流景观概念的提出与阐述,从需求定位、学科定位、解决方案到概念模型,是完备的一条链。相比之下,在流域生态学概念提出和阐述中缺少明确的需求定位和概念模型两个环节。这种差异在影响对概念的有效阐述的同时,也为其后续发展埋下了伏笔。当然,说缺少需求定位,并不是说文中没有给出需求,而是说没有明确其最关键的核心需求,虽然文中提出的社会需求和研究内容也挺多,在之后的探讨中列出的更多^[15];说缺少概念模型,不是说文中没提及作者没意识到,实际上作者将构建流域生态系统的模型当作是流域生态学的任务之一,后面的探讨也遵循了这个路子^[15],但在这个任务上除了一次未达目的的努力外^[30],再没有什么进展。

4 讨论与小结

从客观上来讲,以上这些差异在一定程度上反映出了这两个概念提出时中国与美欧不同的发展需求以及不同的知识背景。在二十世纪90年代中国和欧美处在一个不同的经济社会发展阶段,面对的环境问题也不一样,进而科学发展的现实需求也不一样。在欧美工业化地区,由植被破坏所带来的水土流失、洪水等自然灾害在经过近半个多世纪的努力后到50年代已经逐渐开始转好^[4],20年代兴起的大规模水资源开发建设浪潮在60年代一片环境保护运动中也逐渐消退,水污染问题在近一个世纪的与工业发展的抗争之后已在70年代开始被严肃对待^[68],经过对淡水生态系统退化问题的20多年的探讨到90年代河流生态重建已经备受关注,而如何进行有效的生态重建则成为一个重要的研究课题^[35-36];而在中国,大规模的植被破坏所带来的水土流失、洪涝灾害在98'大洪水之后才开始去着力应对,由于经济发展的能源需求大规模水资源开发建设截至今日还在积极推进,水污染问题虽一直受关注但也只是在近年才动真格,在90年代水灾害、水资源、水环境、水生态等问题同时存在、互相交织,而如何积极应对是当时也是现在最重要的任务^[1]。因此欧美的现实需求是河流生态系统保护与恢复,而这也正是为什么提出河流景观概念而不是将流域生态研究体系化,同时这也是河流景观概念的目标定位;而中国的现实需求相当复杂,简略来讲就是内陆水体及水生生物资源保护与合理利用、经济社会可持续发展,这正是为什么提出流域生态学概念而非像欧美那样倡导河流景观的研究,同时这也就成为流域生态学的目标定位,其模糊而复杂,自是不足为怪。

由于面对的问题不一样,科学研究所寻求的发展方向也不一样,进而知识储备也有较大的差异,当然,知识储备也因科学技术发展水平的不同而存在差异。在欧美由于对河流生态系统的长期研究,到90年代已经有相当的知识积累,流水生态系统的四维特性^[55]的提出就是其中一个成果,而后在河流生态重建的指引下,这些知识积累也逐渐被吸纳整合进河流景观概念当中^[13],并得到进一步的发展,当然,对于河流景观的理解并不是孤立于流域的,而是在流域巢式等级结构^[52]的格局之中的;而在中国由于实际应用需要,虽然基础研究尚不充足,但在80年代就已经提出了具有指导意义的“山-江-湖”概念模型^[8-9],该概念模型的提出对此后的发展具有重要影响,流域生态学概念的提出中就有它的影子^[2],再后的“山-河-湖-海互动理论”也深受其影响^[69-70]。正是这些现实问题的不同、发展方向的不同、知识积累的不同,最终导致了两个不同概念的提出。当然,思维方式和论述方式的不同也对其有不小的贡献。

总结河流景观和流域生态学两个概念提出时的客观处境的差异:1)所处的背景阶段不一样,一个是处于后工业化时期,一个是处于工业化过程中;2)所面临的问题不一样,一个是在二百年左右的工业化过程中相应问题逐一出现逐一应对,到90年代其面对的主要是河流生态重建,一个是在短短数十年的工业化过程中问题集中出现,到90年代其面对的则是如何集中处理这些集中出现的问题;3)目标定位不一样,一个是要为河

流生态重建提供坚实的概念模型基础,一个是要为一系列流域问题的应对提供知识支撑;4)具体目的不一样,一个是针对对河流生态系统的更全面理解而提出的河流景观,一个是奔着对流域生态系统的更全面理解而提出的流域生态学;5)知识背景不一样,一个是基于河流-流域的等级框架,在影响河流生态系统的陆地区域主要集中在河岸带,以及河流生态系统生态过程具有明显的四维时空结构的基础上提出的,一个是在对流域的山-江-湖的理解框架下提出的;6)知识积累不一样,一个科学技术水平相对较高,有相对充足的知识储备,一个科学技术水平相对较低,知识储备相对缺乏。

整体来讲,由于两个概念提出时所面对的状况,一个问题简单目标明了知识储备充足,一个问题复杂目标含糊知识储备贫乏,进而导致两个概念的阐述一个具体清晰可操作,一个宽泛模糊难落实,并最终导致了一个蓬勃发展有序推进一个惨淡经营艰涩难行。但如果抛开客观的历史的深层次的原因,并假设河流景观的成功经验是可以借鉴的,那么就当前的状况分析来看,缺少一个能够有效指导研究工作开展的概念模型与框架体系直接阻碍了流域生态学的发展,没有一个明确可操作的需求牵引和目标定位成为流域生态学发展的内在不足。当然,这两个缺陷并非彼此孤立,而是存在强烈的内在联系。需求不明确、目标不明确就无法明确一个新提出的概念究竟要解决什么问题,进而对这个新概念的建构就缺少基本的指向,也就弄不清楚究竟能做什么、该做什么、怎么做,进而也就无法建立具有针对性的模型和具有指导意义的框架。需要说明的一点是,在此说流域生态学缺少概念模型,并不是说没有关于流域的框架性模型——实际上有关流域的模型形形色色并不少,比如引入了自然-社会-经济复合生态系统的流域生态系统^[12],比如针对地貌-水文的数字流域模型^[71]等等,而是说缺少一个针对流域生态学要研究要解决的问题的概念模型,也就是说缺少一个对研究对象的模型化把握。

5 对流域生态学发展的几点建议

经过比较分析,困扰流域生态学发展的的问题及其原因大抵如上所述,然而至于如何把流域生态学从这困境中拖出来,尚需诸学者共同努力,不敢自专妄断。在此,笔者谨将一些想法提出来以资方家批评。鉴于河流景观概念模型已经发展得比较成熟,其生态结构和生态过程等的探讨业已成型,因此应该充分吸收借鉴河流景观的发展,针对阻碍流域生态学发展的两大问题,重新思考流域生态学的目标定位和基础模型,以及由之衍生出来的研究框架,使其明确具体可操作。由于我国大的发展阶段、所面对的生态环境根本问题都还没变,所以流域生态学的整体目标尚不能改弦更张。

(1)河流景观是针对于河流生态系统重建的需要而提出的,并以景观尺度来整体考虑河流生态系统的生物多样性和生态过程,以支撑河流景观的生态系统管理和促进淡水生物多样性的保护和重建为目标;而流域生态学则应该针对我国日趋严峻的各类流域问题交织的现状,以流域尺度来整体考虑流域生态系统的结构、过程,以及人类活动,以支撑流域生态系统管理和促进流域生态系统健康发展为目标。在我国,各类流域问题的集中出现,注定了流域问题本身成为一个超越传统学科能力范围的集成问题。集成的问题需要以集成的方法予以应对,所以流域生态学需要将各类问题纳入整个流域生态系统当中考虑,以完整的流域过程关联起方方面面的问题,这是一个系统工程。

(2)在河流生态系统重建的指引下,河流景观针对的是景观尺度的河流系统,以流水系统所维持的景观组合为核心,建立了河流景观的四维结构模型;而流域生态学则应在集成应对流域问题的指引下,针对流域尺度的水-陆系统,以流域水循环驱动的流域生态系统为核心,建立能够表征流域生态系统特征的模型。构建流域生态系统模型有两个目的:1)深化对水循环驱动的流域生态系统的理解,2)为流域生态学研究框架的构建提供基础支撑。该模型的构建和完善应着重于流域生态的主要特性,在此所谓的主要特性,1)是能够表征流域生态系统与其它类型生态系统不同的特性,2)是能够有效协助理解和应对目前所面临的流域生态环境问题的特性。当然,构建模型之前还有一项重要工作,即弄清楚流域概念本身的内涵,否则模型的构建就有根基不稳的危险。

(3) 河流景观以景观尺度的河流系统为研究对象,以河流景观四维结构模型为支撑,展开了其研究框架的建构;而流域生态学则应以流域尺度的水-陆系统为研究对象,以流域生态系统模型为支撑,构建其研究框架。河流景观的主要研究内容:淡水水生生物的时空分异^[72]、河岸带的生物多样性格局及其演替^[73]、河流生态系统上下游之间的生态过程^[74]、淡水生态系统与河岸带间的生态过程^[75]、河流与地下水之间的生物过程^[76]、淡水生态系统的重建^[46]等,无不以河流景观四维结构模型为支点。流域生态学的主要研究内容也应该与流域生态系统模型达成一种协同关系,以模型为研究开展的支点,同时研究的开展反过来又对模型进行补充和优化。当然,研究框架构建之前需先想清楚流域生态学究竟要囊括哪些内容,尤其是区别“流域内的生态学”、“流域尺度的生态学”和“流域生态学”。

在三个常规的系统性应对措施之外,有一个有益的突破点值得关注。2003年 M. Loreau 将只关注生物体迁移交换的集合种群(meta-population)和集合群落(meta-community)概念外推,提出研究跨生态系统边界的物质流、能量流和生物体流的集合生态系统(meta-ecosystem)概念,并将其设计的集合生态系统模型视作一个近封闭系统^[77]。在2000年前后的生态系统生态学与景观生态学合流中,景观生态学的空间异质性和斑块间的相互作用与生态系统生态学的物质流、能量流、源-汇关系相结合,成为一个新的研究热点^[78]。我们认为这两者对流域生态学的发展具有强烈的启发意义,因为流域生态系统就是一个具有空间异质性的集合生态系统。而这两者产生的碰撞^[79]又暗示了流域生态学在这一发展方向中的优势,因为流域生态系统所具有的内部异质性和明确外部边界,以及水循环所驱动的生物地球化学过程^[67]使其成为极具代表性的集合生态系统和景观系统。

总的来讲,如果对流域生态学的目标定位没有大的异议,那么流域生态学的进一步发展最要紧解决的就是两个具体问题:1)对流域生态系统的理解,即流域生态系统基础模型的建立;2)对流域生态学核心问题的理解,即由流域生态系统基础模型所支撑的流域生态学研究框架的建立。或许在概念框架(conceptual framework,即流域生态系统基础模型)和模型模板(model template,即流域生态学研究框架)之后还需要一个工作模型(working model,即研究范例)^[80]。另外,因为流域生态学所面对的问题具有高度的复杂性,所以在流域生态系统模型的构建中,需要在充分吸纳借鉴国内外相关研究成果^[51,81-82]的同时,还要对国内的实际问题有高度的理解。

致谢:感谢复旦大学生物多样性科学研究所方长明教授对文章摘要的行文表述上的批评与修改。

参考文献 (References):

- [1] 王毅. 流域性环境问题变化与转型期流域政策取向. 科技导报, 2008, 26(17): 19-23.
- [2] 蔡庆华, 吴刚, 刘建康. 流域生态学: 水生态系统多样性研究和保护的一个新途径. 科技导报, 1997, 15(5): 24-26.
- [3] 赵斌. 流域是生态学研究的最佳自然分割单元. 科技导报, 2014, 32(1): 12-12.
- [4] Hall M. Repairing mountains: restoration, ecology, and wilderness in twentieth-century Utah. Environmental History, 2001, 6(4): 584-610.
- [5] Schindler D W, Newbury R W, Beaty K G, Campbell P. Natural water and chemical budgets for a small Precambrian lake basin in central Canada. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1976, 33(11): 2526-2543.
- [6] 卡尔夫. 湖沼学: 内陆水生态系统. 古滨河, 刘文正, 李宽意, 译. 北京: 高等教育出版社, 2011: 120-134.
- [7] 杨光, 丁国栋, 屈志强. 中国水土保持发展综述. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2006, 5(增刊): 72-77.
- [8] 吴国华. 治湖 治江 治山, 山江湖一起抓. 江西农业大学学报, 1984, (4): 94-96.
- [9] 吴国琛, 樊哲文. 江西山江湖工程进入 21 世纪. 国际贸易, 1995, (10): 34-35.
- [10] 湖泊及流域科学学科发展与优先领域学术研讨会秘书组. 湖泊及流域科学研究进展与展望. 湖泊科学, 2002, 14(4): 289-300.
- [11] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9.
- [12] 饶正富. 流域生态环境规划的系统生态学方法. 武汉大学学报: 自然科学版, 1991, (1): 85-92.
- [13] Ward J V. Riverine landscapes: Biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation. Biological Conservation, 1998, 83(3): 269-278.
- [14] Carbonneau P, Fonstad M A, Marcus W A, Dugdale S J. Making riverscapes real. Geomorphology, 2012, 137(1): 74-86.
- [15] 邓红兵, 王庆礼, 蔡庆华. 流域生态学——新学科、新思想、新途径. 应用生态学报, 1998, 9(4): 443-449.

- [16] 王成祖. 坚持山江湖林综合治理是根治长江洪灾的战略选择. 林业经济, 1998, (5): 5-11.
- [17] 王超俊. 长江流域生态平衡面临的若干问题. 生态学杂志, 1983, (4): 34-37.
- [18] 汪达. 黄河、长江流域生态环境恶化与森林植被的关系. 环境研究与监测, 1988, (4): 1-7.
- [19] 汪达汉. 论长江流域生态危机与生态建设的对策. 长江流域资源与环境, 1993, 2(1): 81-87.
- [20] 庄国泰. 长江水灾与长江流域生态破坏的关系分析. 环境保护, 1998, (9): 2-3.
- [21] 雷慰慈. 长江流域生态形势、灾害趋势与湿地保护. 地球科学——中国地质大学学报, 1999, 24(4): 335-338.
- [22] 李长安, 殷鸿福, 俞立中, 许厚泽, 蔡述明, 陈中原, 王建, 殷瑞兰. 关于长江流域生态环境系统演变与调控研究的思考. 长江流域资源与环境, 2001, 10(6): 550-557.
- [23] 刘建康, 曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策. 长江流域资源与环境, 1992, 1(1): 17-23.
- [24] 谢平, 陈宜瑜. 加强淡水生态系统中生物多样性的研究与保护. 中国科学院院刊, 1996, 11(4): 276-281.
- [25] 陈家宽, 李博, 吴千红. 长江流域的生物多样性及其与经济协调发展的对策. 生物多样性, 1997, 5(3): 217-219.
- [26] 刘茂松, 姜志林, 李湘萍. 长江中下游湿地系统的功能及其保护. 南京林业大学学报, 1999, 23(2): 27-30.
- [27] 吴豪, 虞孝感, 姜加虎. 长江流域湿地生态系统研究的意义和重点. 生态经济, 2001, (11): 21-22, 26-26.
- [28] 虞孝感. 长江流域生态环境的意义及生态功能区段的划分. 长江流域资源与环境, 2002, 11(4): 323-326.
- [29] 尚宗波, 高琼. 流域生态学——生态学研究的一个新领域. 生态学报, 2001, 21(3): 468-473.
- [30] 陈求稳, 欧阳志云. 流域生态学及模型系统. 生态学报, 2005, 25(5): 1184-1190.
- [31] Décamps H, Fortuné M, Gazelle F, Pautou G. Historical influence of man on the riparian dynamics of a fluvial landscape. *Landscape Ecology*, 1988, 1(3): 163-173.
- [32] Dynesius M, Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world. *Science*, 1994, 266(5186): 753-762.
- [33] Schmid A S. Design in the river landscape. *Landscape Planning*, 1983, 10(1): 31-41.
- [34] Langdon P. Down by the river landscape features and urban design are keys to the future in Portland, Oregon and Louisville, Kentucky. *Landscape Architecture*, 1992, 82(6): 44-49.
- [35] Cals M R J, Postma R, Buijse A D, Martijn E C L. Habitat restoration along the River Rhine in The Netherlands: Putting ideas into practice. *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems*, 1998, 8(1): 61-70.
- [36] Tockner K, Schiemer F, Ward J V. Conservation by restoration: The management concept for a river-floodplain system on the Danube River in Austria. *Aquatic Conservation; Marine and Freshwater Ecosystems*, 1998, 8(1): 71-86.
- [37] Bornette G, Amoros C, Lamouroux N L. Aquatic plant diversity in riverine wetlands: the role of connectivity. *Freshwater Biology*, 1998, 39(2): 267-283.
- [38] Bornette G, Amoros C, Piegay H, Tachet J, Hein T. Ecological complexity of wetlands within a river landscape. *Biological Conservation*, 1998, 85(1/2): 35-45.
- [39] Ward J V, Tockner K, Schiemer F. Biodiversity of floodplain river ecosystems: Ecotones and connectivity. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1999, 15(1/3): 125-139.
- [40] Ward J V, Tockner K. Biodiversity: towards a unifying theme for river ecology. *Freshwater Biology*, 2001, 46(6): 807-819.
- [41] Tockner K, Ward J V, Edwards P J, Kollmann J. Riverine landscapes: an introduction. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 497-500.
- [42] Wiens J A. Riverine landscapes: taking landscape ecology into the water. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 501-515.
- [43] Ward J V, Tockner K, Arscott D B, Claret C. Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 517-539.
- [44] Church M. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 541-557.
- [45] Poole G C. Fluvial landscape ecology: addressing uniqueness within the river discontinuum. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 641-660.
- [46] Jansson R, Nilsson C, Malmqvist B. Restoring freshwater ecosystems in riverine landscapes: the roles of connectivity and recovery processes. *Freshwater Biology*, 2007, 52(4): 589-596.
- [47] Tetzlaff D, Soulsby C, Bacon P J, Youngson F, Gibbins C, Malcolm I A. Connectivity between landscapes and riverscapes—a unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science?. *Hydrological Processes*, 2007, 21(10): 1385-1389.
- [48] Rohde S, Schütz M, Kienast F, Englmaier P. River widening: an approach to restoring riparian habitats and plant species. *River Research and Applications*, 2005, 21(10): 1075-1094.
- [49] Hohensinner S, Jungwirth M, Muhar S, Schmutz S. Spatio-temporal habitat dynamics in a changing Danube River landscape 1812-2006. *River Research and Applications*, 2011, 27(8): 939-955.
- [50] Amoros C, Bornette G. Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 761-776.
- [51] Erös T, Olden J D, Schick R S, Schmera D, Fortin M J. Characterizing connectivity relationships in freshwaters using patch-based graphs. *Landscape Ecology*, 2012, 27(2): 303-317.
- [52] Frissell C A, Liss W J, Warren C E, Hurley M D. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, 1986, 10(2): 199-214.
- [53] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1957, 8(6): 913-920.
- [54] Schumm S A. Patterns of Alluvial Rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1985, 13: 5-27.
- [55] Ward J V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8(1): 2-8.

- [56] Ward J V, Bretschko G, Brunke M, Danielopol D, Gibert J, Gonser T, Hildrew A G. The boundaries of river systems: the metazoan perspective. *Freshwater Biology*, 1998, 40(3): 531-569.
- [57] Ward J V, Tockner K, Uehlinger U, Malard F. Understanding natural patterns and processes in river corridors as the basis for effective river restoration. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2001, 17(4/5): 311-323.
- [58] Dosskey M G, Bertsch P M. Forest sources and pathways of organic matter transport to a blackwater stream: a hydrologic approach. *Biogeochemistry*, 1994, 24(1): 1-19.
- [59] Raikow D F, Walters D M, Fritz K M, Mills M A. The distance that contaminated aquatic subsidies extend into lake riparian zones. *Ecological Applications*, 2011, 21(3): 983-990.
- [60] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [61] Allan J D. Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2004, 35: 257-284.
- [62] Shang G P, Shang J C. Causes and control countermeasures of eutrophication in Chaohu lake, China. *Chinese Geographical Science*, 2005, 15(4): 348-354.
- [63] Xu H, Yang L Z, Zhao G M, Jiao J G, Yin S X, Liu Z P. Anthropogenic impact on surface water quality in Taihu Lake Region, China. *Pedosphere*, 2009, 19(6): 765-778.
- [64] Schlosser I J. Stream fish ecology: a landscape perspective. *BioScience*, 1991, 41(10): 704-712.
- [65] Pickett S T A, Cadenasso M L. Landscape Ecology: spatial heterogeneity in ecological systems. *Science*, 1995, 269(5222): 331-334.
- [66] Forman R T T. *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. New York: Cambridge University Press, 1995: 1-632.
- [67] Lotspeich F B. Watersheds as the basic ecosystem: this conceptual framework provides a basis for a natural classification system. *Water Resources Bulletin*, 1980, 16(4): 581-586.
- [68] Molle F. River-basin planning and management: The social life of a concept. *Geoforum*, 2009, 40(3): 484-494.
- [69] 李长安, 殷鸿福, 俞立中, 陈中原. 流域环境系统演化概念模型: 山-河-湖-海互动及对全球变化的敏感响应——以长江为例. *长江流域资源与环境*, 2000, 9(3): 358-363.
- [70] 李长安, 陈进, 陈中原, 王建, 王超, 范北林. 长江流域水环境问题研究之思考——基于流域演化“山-河-湖-海互动理论”的认识. *长江科学院院报*, 2009, 26(5): 11-17.
- [71] 王光谦, 刘家宏, 李铁键. 黄河数字流域模型原理. *应用基础与工程科学学报*, 2005, 13(1): 1-8.
- [72] Murria C, Bonada N, Arnedo M A, Prat N, Vogler A P. Higher beta- and gamma-diversity at species and genetic levels in headwaters than in mid-order streams in Hydropsyche (Trichoptera). *Freshwater Biology*, 2013, 58(11): 2226-2236.
- [73] D'Souza L E, Six L J, Bakker J D, Bilby R E. Spatial and temporal patterns of plant communities near small mountain streams in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, 42(2): 260-271.
- [74] Childress E S, Allan J D, McIntyre P B. Nutrient subsidies from iteroparous fish migrations can enhance stream productivity. *Ecosystems*, 2014, 17(3): 522-534.
- [75] Muehlbauer J D, Collins S F, Doyle M W, Tockner K. How wide is a stream? Spatial extent of the potential "stream signature" in terrestrial food webs using meta-analysis. *Ecology*, 2014, 95(1): 44-55.
- [76] Hancock P J, Boulton A J, Humphreys W F. Aquifers and hyporheic zones: Towards an ecological understanding of groundwater. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13(1): 98-111.
- [77] Loreau M, Mouquet N, Holt R D. Meta-ecosystems: a theoretical framework for a spatial ecosystem ecology. *Ecology Letters*, 2003, 6(8): 673-679.
- [78] Lovett G M, Jones C G, Turner M G, Weathers K C. Ecosystem function in heterogeneous landscapes // Lovett G M, Jones C G, Turner M G, Weathers K C, eds. *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*. New York: Springer, 2005: 1-4.
- [79] Lovett G M, Jones C G, Turner M G, Weathers K C. Conceptual frameworks: Plan for a half-built house // Lovett G M, Jones C G, Turner M G, Weathers K C, eds. *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*. New York: Springer, 2005: 463-470.
- [80] Cadenasso M L, Pickett S, Weathers K C, Jones C G. A framework for a theory of ecological boundaries. *Bioscience*, 2003, 53(8): 750-758.
- [81] Peterson E E, Ver Hoef J M, Isaak D J, Falke J A, Fortin M J, Jordan C E, McNyset K, Monestiez P, Ruesch A S, Sengupta A, Som N, Steel E A, Theobald D M, Torgersen C E, Wenger S J. Modelling dendritic ecological networks in space: an integrated network perspective. *Ecology Letters*, 2013, 16(5): 707-719.
- [82] Cheng G D, Li X, Zhao W Z, Xu Z M, Feng Q, Xiao S C, Xiao H L. Integrated study of the water - ecosystem - economy in the Heihe River Basin. *National Science Review*, 2014, 1(3): 413-428.