

DOI: 10.5846/stxb202110192952

彭保发, 刘宇. 河流景观生态服务供给与需求/消费的互馈机制. 生态学报, 2022, 42(19): 7707-7716.

Peng B F, Liu Y. Regime of the feedbacks between ecosystem service supply and demand/consumption in river landscape. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7707-7716.

河流景观生态服务供给与需求/消费的互馈机制

彭保发¹, 刘 宇^{2,3,*}

1 湖南文理学院, 洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同创新中心, 常德 415000

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100190

摘要: 河流景观系统孕育了人类文明, 为人类社会提供类型多样的生态系统服务。其本身是一个自然景观过程和社会经济过程高度耦合的社会-生态系统, 具有极高的空间异质性、时间动态和鲜明的组织尺度等级结构。当前, 对河流景观系统这种特点所决定的生态系统服务供给与需求/消费互馈的机制研究不够深入, 普遍缺乏从过程角度刻画生态服务供给与需求/消费互馈关系及其时空异质性和尺度特征。生态服务供给、需求和消费产生于社会-生态系统, 是社会-生态耦合的纽带。阐述了河流景观生态服务供给和需求/消费的时空异质性, 阐释了它们时空耦合机制和尺度特征, 梳理了当前对生态服务供给、需求/消费互馈机理研究的不足。认为未来需要在社会-生态系统的框架下, 从景观结构和生态过程出发, 融合景观生态过程和社会过程来深入认识河流景观系统的生态服务供给与区内人类对生态服务的需求/消费之间的互馈机制。未来应重点关注: (1) 河流景观结构和过程决定的生态服务供给和消费的空间分异及驱动机制; (2) 河流生态服务传输的自然和人文载体及其耦合格局; (3) 将生态服务需求/消费通过景观结构和生态过程对生态服务供给的反馈融入生态服务评估的方法框架, 研发基于生态服务供给和需求/消费的社会-生态互馈过程模型。

关键词: 生态服务供给; 生态服务需求和消费; 生态服务流; 河流景观; 社会-生态系统

Regime of the feedbacks between ecosystem service supply and demand/consumption in river landscape

PENG Baofa¹, LIU Yu^{2,3,*}

1 Hunan Province Cooperative Innovation Center for The Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Hunan University of Art and Sciences, Changde 415000, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: River system nested the human civilization by providing various ecosystem services. It is a social-ecological system featured with coupling between physical processes and social-economic activities and their great spatial heterogeneity, the high temporal fluctuation of landscape structure and processes, and the significant hierarchy of operational scales. Presently, the knowledge of the feedbacks between ecosystem services supply capacity and the demands or consumption determined by the above intrinsic nature of river landscape is scarce. There is also lack of process-based delineation of the spatio-temporal heterogeneity and scale behavior of feedbacks in practices. The ecosystem services supply, demand and consumption rooted in the social-ecological system, and are critical linkage in social-ecological coupling. This

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42071239, 42171213); 湖南省自然科学基金面上项目(2021JJ30471); 洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同创新中心项目

收稿日期: 2021-10-19; 采用日期: 2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyu@igsrr.ac.cn

study revealed the spatial and temporal heterogeneity, coupling regime and scale-dependent features of ecosystem services supply and demand/consumption. By literature review, the research weakness on the feedbacks between ecosystem service supply and demand/consumption was revealed. It is argued that in future researches, the ecological processes and the social processes should be integrated to develop a social-ecological framework to reveal the feedbacks between ecosystem service supply and the demand/consumption. There are three recommendations for future researches: (1) the spatio-temporal heterogeneity of the ecosystem services supply and demand/consumption that determined by landscape configuration and social-ecological processes in river landscape; (2) physical and anthropogenic carriers delivering the ecosystem services and their coupling pattern; (3) ecosystem services assessment frameworks incorporating the feedback of ecosystem service demands/consumption to ecosystem service supply through landscape structure and ecological processes, and modelling tools incorporating on feedbacks between ecosystem supply and demand/consumption.

Key Words: ecosystem services supply; ecosystem service demand and consumption; ecosystem services flow; river landscape; social-ecological system

生态系统服务是人类从生态系统结构、过程和功能中获得的各种益处^[1],是耦合生态系统与人类社会福祉的纽带^[2-3]和人类社会感知生态系统变化的重要媒介^[4-5]。河流景观系统是人类文明的主要发祥地^[6-7],为人类提供大量生态服务^[8],包括如饮用水、渔业等资源供给,洪水调蓄、水质净化等调节服务,旅游休闲、景观美学等文化服务和河滨带生物栖息地维持和生物多样性支持服务^[9]。人类文明历史以来,众多的人类生计高度依赖河流景观系统,同时通过对河流生态服务的消费而引起景观结构和生态过程的改变^[10-11],进而影响生态系统服务的供给能力,形成生态服务供给与生态服务需求/消费之间的互馈关系。生态系统服务供给、需求/消费之间的耦合和反馈已经成为生态-社会互馈研究的前沿议题^[12-13]。进入 21 世纪,以水为资源或环境支撑的文化、人居和休闲旅游等产业成为新兴产业。河流生态系统提供的服务满足了人类社会众多的需求,也承受着巨大的压力。随着资源环境开发利用需求的不断增强和扩展,河流景观系统中生态系统服务功能的可持续性与人社会对生态服务的需求和消费之间的矛盾持续增强^[14]。可持续的河流生态系统管理依赖于全部或大部分生态系统服务之间的平衡,需要实现人类社会生态系统服务供给能力和需求/消费的适配。受地理-生态条件时空异质性的控制,生态服务供给和需求/消费的时空失耦是常态,因而常常需要在生态服务间做出权衡^[9]。从人-地关系的角度,如何调控生态服务的供给和消费以保持二者的协同是河流景观管理的核心议题^[15],其基础是对河流景观生态服务供给与消费之间互馈机理的清晰理解。本研究试图从河流景观系统结构和过程的尺度分异入手,分析生态服务供给和需求的时空异质性,阐释它们耦合的机制和空间分异,以加深对流域景观系统人地耦合机制的认知。

1 河流景观生态服务供给的时空异质性

河流景观是水陆过程高度交融的系统,是一个开放、具有等级结构的地理系统,空间结构复杂,是异质性极高的复合系统^[16-17],既包括溪流等细小支流,也包括宽阔的干流河谷和入湖(海)三角洲。这些单元又包含了具有不同生态功能的次级景观单元。河流景观中生态服务的供给强烈地依赖水文过程,它接收上游流域以水为载体的物质、能量和信息的汇聚,承纳泥沙、生物体、碳氮磷等物质的传输^[18],其属性受水文、泥沙传输、土壤-植物动态、生物地球化学过程和生物相互作用等许多因素的共同控制^[7],景观结构和地理-生态过程具有较高的时间动态^[19],主要驱动因素亦随流域空间组织尺度而异^[20]。

河流生态系统在从细小的小溪、支流到大陆尺度的巨型流域多个尺度为人类提供大量生态服务^[8]。相比其他景观类型,河流景观具有丰富的景观类型单元和很高的生态服务供给能力^[8, 21]。这些生态服务大多与水域和河滨带景观结构和生态过程紧密关联^[18]。世界上主要的文明都与河流景观密切联系,甚至以其为主要发展依托,形成了大量的有形和无形的文化遗存和风俗传承,因而河流景观往往具有很高的文化服务功

能^[8]。河流是人类社会淡水的重要来源,大量的生活废水和固体垃圾又通过河流来消纳和输送到海洋。由于河流这些功能的普遍性,对供水、污染消纳等基于水文过程的调节服务的研究较为普遍^[18, 22],其过程机理也较为清晰。河流景观因形态、小气候等特征,以及城市、村落等聚落畔河分布的普遍特点,成为人类生活休闲的热点景观类型,是休闲服务的高价值区。从上游到下游,河流景观中生态系统结构和过程趋于复杂多样^[20](表 1),所形成的生态服务供给亦随之趋于丰富多彩^[9]。从源头到干流和下游洪泛平原区,各项生态服务的供给能力随其所依赖的生态系统结构和过程而出现空间分异(图 1)。如生活、农业、工业供水、航运服务功能随着上游到下游水量的增加而不断增强,而通过支持发电形成的生态服务功能则在中上游往往较强,下游则相对较弱(图 1)。主导河流景观过程的水文过程具有很强的时间异质性。因此,河流景观系统生态服务供给能力呈现较高的时间异质性和较大的周期性,伴随多尺度的随机动态。如供水服务取决于河水量,而水量季节性变化巨大,由此导致供水服务的高时间异质性。因此,刻画河流景观内部的生态服务异质性是河流景观生态服务时空动态研究的重要方面。目前,对河流景观生态系统服务的时空动态往往基于服务总量的表征^[23—24],缺乏对服务空间异质性的显式表达。

表 1 流域和支流尺度控制景观系统动态的过程(改自 Beechie 等^[20])

Table 1 Processes determining the landscape dynamic at watershed and sub-watershed scale (Beechie et al. ^[20])		
尺度 Scale	生态系统特征 Ecosystem features	驱动过程 Driving processes
流域尺度 Watershed	泥沙	滑坡、地表侵蚀、土壤蠕动
	水文	地表径流和地下径流
	有机质	树倒、枝叶凋落
	光 and 热	太阳入射和向水体的对流交换
	养分	地下水流动中的溶解养分传输
	污染物	农田和工业场地地表和浅层地下径流输送的污染物、杀虫剂
	生物	水生生物体和种子的迁移
支流尺度 Sub-watershed	河道形态和栖息地结构	河道移动、河岸崩塌、沙坝形成、洪泛平原沉积、树木繁殖、倒木、动物活动等
	热量节律	遮荫、上下层水体热交换
	水化学	溶解养分传输和交换、水生植物和河岸植被吸收、杀虫剂和其他污染物输入
	河滨带物种组成	幼苗定植、树木生长、演替
	水生物种组成	藻类和水生植物光合作用、食物网形成、捕食、栖息地选择、竞争、繁殖等

2 河流景观生态服务需求的时空异质性

生态服务需求产生于人类因基本的生存需要和追求更高生活质量两个方面。相应地,生态服务的消费是指人类生产和生活对生态服务的消耗、利用和占用^[26]。生态服务的需求和消费与传统经济学上的概念不完全类同,它不是纯粹的市场行为,包括不受景观主导的人类的主动行为和因人类居住、生产和生活的地理位置而不得不接受的被动需求和消费。不同生产力水平和位于不同地理位置的社区对生态服务供给的依赖性差别巨大^[27],由此导致生态服务需求和消费的类型和数量的区域差异。对河流景观而言,从支流到干流、从上游到下游由于气候、水文条件、地形地貌等河流景观条件以及人类开发利用的景观类型组成和空间格局的差别,利用的生态服务类型、利用方式和时机存在很大差异^[9]。因此,不管是人类主动的还是地理位置决定的被动的生态服务需求和消费在空间上均存在变异性。对人类主动的生态服务需求和消费的量化表达已有较多的理论和方法探讨^[26, 28],但对被动生态服务需求和消费量化及其空间异质性的研究尚未得到充分的关注。人类因基本生存需要产生的生态服务需求和消费在数量上较为稳定,空间异质性主要受自然地理环境制约,在时间上也基本稳定,表现出一定的节律性。因追求更高生活质量产生的生态服务需求和消费大部分在年际尺度相对均衡,年内则因社会活动的周期性而表现出较强的周期性,特别是文化服务。河流景观结构和功能具有鲜明的季节性,因而生态服务的供给也呈现年内的高度时间动态性和空间异质性。河流景观生态服务供

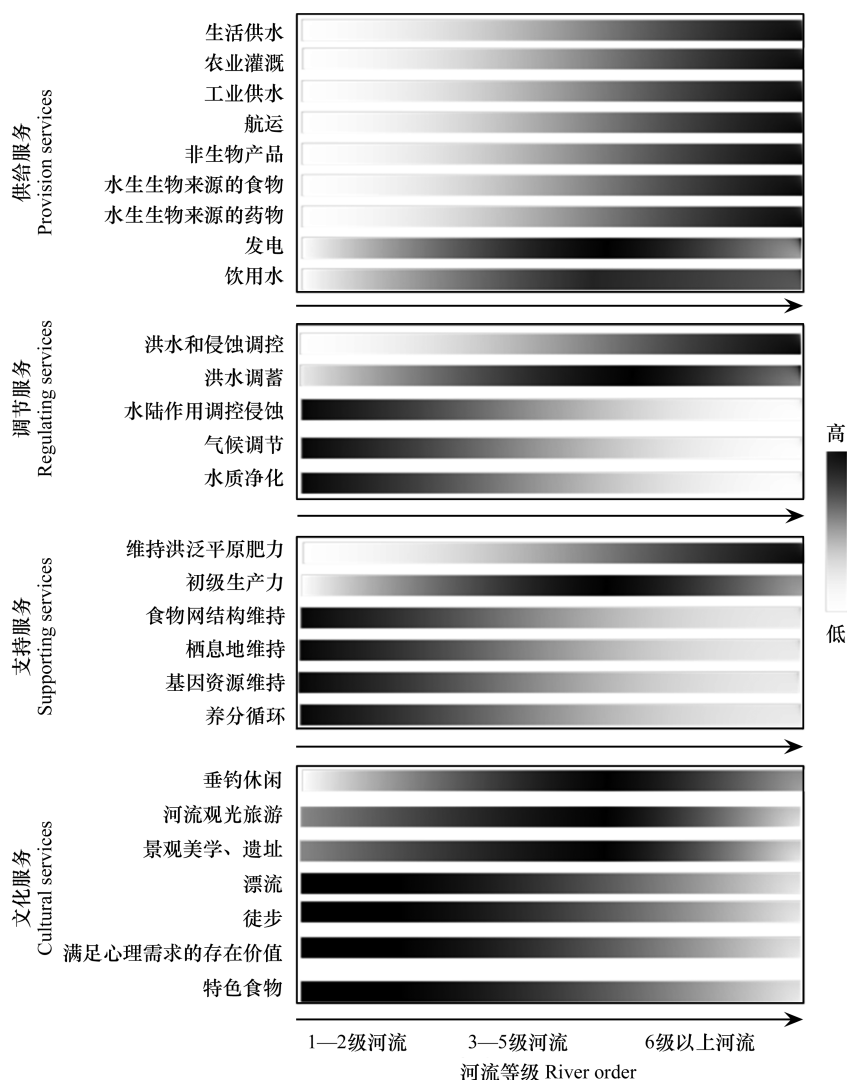


图1 流域景观生态服务功能强度随河流等级的变异(改自 Yeakley 等^[9])

Fig.1 Spatial heterogeneity of the ecosystem services in river landscape (adopted from Yeakley et al.^[9])

河流分级为 Strahler^[25] 分级;支流到干流等级增高;灰度条颜色深浅表示生态服务功能的大小,从灰到黑色增大

给极高的时间异质性与人类社会基本生态服务需求时间上相对均衡导致生态服务供给与需求时间节律上错位现象,即生态服务供给和需求的时间失耦。这种矛盾随着人类社会科技进步和人类活动时空自由度的增加而得到缓解。

3 河流景观生态系统服务供给与需求/消费耦合的机制

河流生态系统服务供给与需求/消费之间的互馈是社会-生态系统耦合的基本途径,是理解生态系统和社会相互作用的切入点。以往的研究对河流景观的生态过程以及人类活动对这些过程的改变有了深刻的认识^[29—31]。在河流景观系统中,生态服务消费与供给在空间上往往不完全重叠^[32],多项生态服务供给和需求存在空间分离,如洪水调蓄、水质净化常常是提供给下游的服务。流域景观单元和人工设施系统形成的景观结构和功能连通以及社会活动连通将景观系统生态服务供给和人类社会的生态服务需求联系起来^[9],形成生态服务从景观系统向社会系统的传输,进而通过社会系统的生产、消费等环节融入到社会系统中,转化为支持人类社会的各类价值(图2)。在生态系统服务供给与消费耦合机制中,景观结构和过程是生态服务供给形

成的基础^[33],也是生态服务消费反馈生态服务供给的纽带。因此,生态服务供给与消费研究的重要内容之一是明晰生态服务供给和消费之间以景观结构及其中的生态过程为纽带的互馈机制,以支持生态系统管理决策。

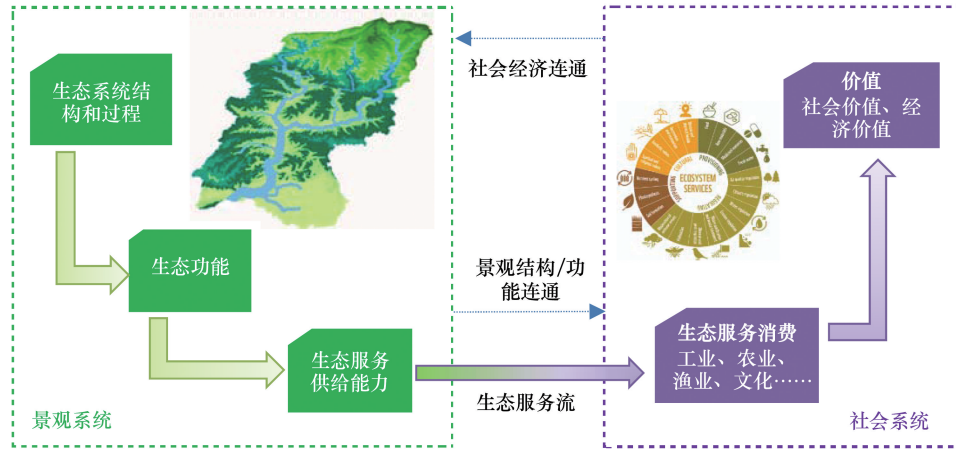


图2 景观结构与功能到人类福祉的级联转化机制

Fig.2 The cascade framework for the transformation of landscape configuration and functions to human wellbeing

生态服务供给与人类社会生态服务需求/消费之间在时间维度的耦合随生态服务项而异,主要由景观结构和过程的时间动态决定。例如,人类对供水服务、固碳服务、粮食供给的需求在年内大体上保持稳定,但景观系统提供这些服务所依赖的景观过程具有极强的季节性,导致服务供给极高的时间异质性。土壤保持服务、洪水调节服务因景观过程对人类利益的威胁而产生,因而其需求/消费与产生这类威胁的景观过程的时间节律一致,但需求/消费与供给在时间上却往往不完全重叠,存在较强的时间失耦(图3)。文化服务本质上是人类社会与景观系统相适应的结果,人类社会的文化服务需求和消费具有极高的弹性,总体上表现出供给与需求和消费相吻合的状态。人类社会因科技进步、制度上的调整和行为上的适应性改变均会改变生态服务供给和需求/消费时空耦合的状态和机制。例如通过储存技术的进步改变粮食等产品供给与需求的时间失耦,通过运输技术的改变解决空间失耦,通过网络技术弥补文化服务供给与需求和消费的空间和时间失耦。

4 河流景观生态服务供给与需求/消费耦合的尺度特征

河流景观系统结构和过程从分水岭到下游洪泛平原区、从支流到干流具有明显的空间分异^[20, 34—35],随组织尺度而逐渐变更,由此奠定了河流景观系统中生态服务功能的时空异质性。景观中生态系统服务源于生态系统结构和过程,因而具有鲜明的尺度特征。在河流景观系统中,上游到下游地形地貌、植被、河网结构等往往发生规律性的更替或过渡,引起各类物理、化学和生物过程速率、频率、强度和组合随景观组织尺度而变化^[36—38]。水文过程和泥沙的运移是河流景观系统的基础过程,从坡面产汇流、侵蚀产沙到干流的水文情势和输沙也呈现出鲜明的尺度效应^[39—41]。受流域景观格局的控制,聚落的分布从上游到下游亦在规模、结构等方面逐渐变化,人类对环境的适应也逐渐形成了生态服务需求/消费随河流景观系统组织尺度的更替。由此,河流景观系统生态服务供给和需求/消费的类型、生态服务供给区与需求区之间的时空联系、生态服务消费的方式和途径等亦随空间尺度的变化而改变。从上游到下游,生态服务供给和需求之间的联系由景观过程主导转向社会过程主导,逐渐从被动获取生态服务向主动获取生态服务转变。从立地尺度到流域或区域尺度,生态服务供给和需求之间的联系逐渐由景观生态过程控制转向社会过程的控制(图4)。随着社会经济、科技的发展,生态服务供给和需求的联系逐渐从自然过程驱动为主向社会经济活动驱动为主转变。当前,在流域生态系统服务研究中,这种随流域景观系统组织尺度而变更的生态系统服务供给和需求以及它们之间的耦合机制

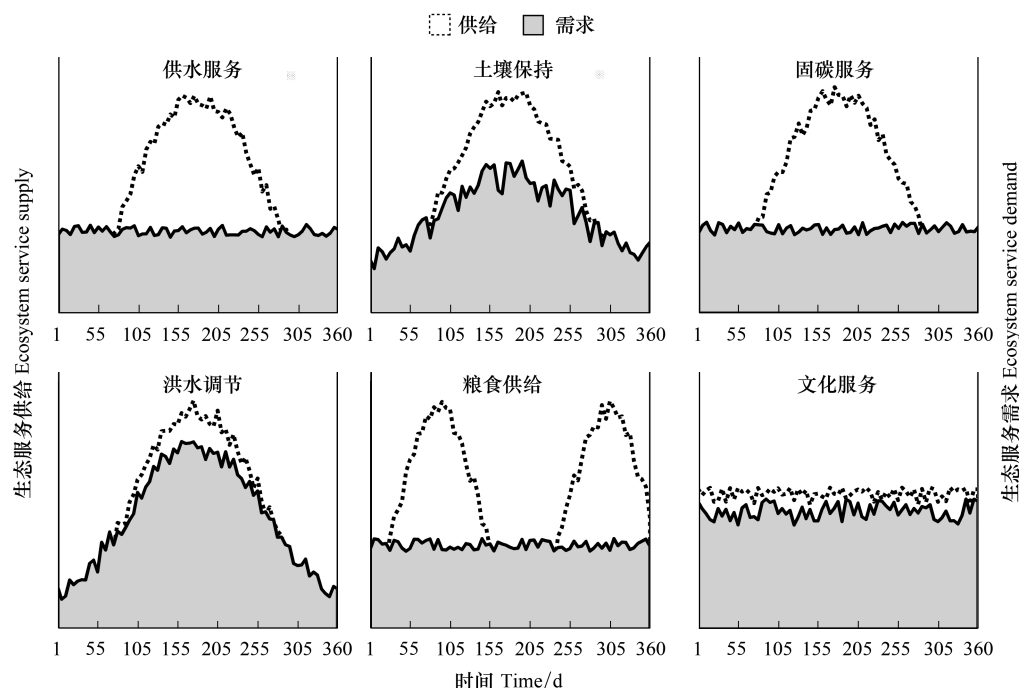


图3 河流景观典型生态系统服务供给与需求的时间耦合示意图

Fig.3 Temporal coupling between the supply and demand of critical ecosystem services in river landscape

没有得到深刻的认知,制约了流域到区域尺度对人-地耦合机制的深度理解。

5 河流景观生态服务供给与需求/消费反馈机理研究的不足

当前,对河流景观系统生态服务供给和需求/消费的互馈机制的认知仍存在很大的局限^[42]。河流是流域景观系统物质和能量的传输通道,是景观结构、过程动态度非常高的景观系统。河流景观生态系统服务与众多的流域过程紧密联系而呈现出极高的空间异质性、时间动态和复杂性,导致对河流生态系统服务功能理解难度大,对生态服务供给和传输的评估不确定性高。

在生态系统服务理论和方法研究方面,特别是评估应用中普遍缺乏从过程的角度表达生态服务供给与需求/消费互馈关系。尽管对河流景观生态服务的评估、评价和量化研究众多^[18, 43],但大多以服务供给量和人类利用的产品化的价值量估算为主^[44—45],对河流生态服务时空动态的研究往往将河流作为一个整体来看待^[46—47],而对河流景观内部结构和生态过程时空异质性基础上的生态服务的空间异质性的刻画匮乏。对产品供给等物质形态的生态服务供给不管是研究对象还是服务项之间的关系都比较容易理解^[48—50]和量化^[51],但对河流景观调节服务、支持服务、文化服务等生态服务的定量方法和指标仍然比较匮乏,特别是具有生物物理基础的指标^[52]。对文化服务功能和休闲服务功能的研究注重从消费的角度理解^[21],相关的评估依然存在臆断,常采用货币形式的价值化方法表征,大多局限于旅游等市场价值的评估^[53]。生态服务是生态系统和社会耦合系统的产物。自然过程决定生态服务供给的潜力,社会系统主导生态服务的需求和消费。从生态系统服务的内涵上,只有当生态系统系统过程和功能带来的益处为人类所需(意识到的和没意识到的需求),才能称其为生态服务^[54—55]。生态服务从供给能力形成、生态服务的传输到消费转化为人类社会的福祉是一个级联的生态-社会过程。当前的研究对生态系统提供这种生态服务的供给能力及其向人类社会转化的环境和社会过程的认知和表达不足。目前的相关研究大多将河流景观生态系统服务放在湿地生态系统服务^[56—57]或陆地水生态系统生态服务^[44]下面,以较大的湿地单元开展评估,注重终端服务而对服务供给及其向人类福祉转化的表达不够。未来需要在社会-生态耦合的范畴内来研究生态服务,开展生态服务评估。

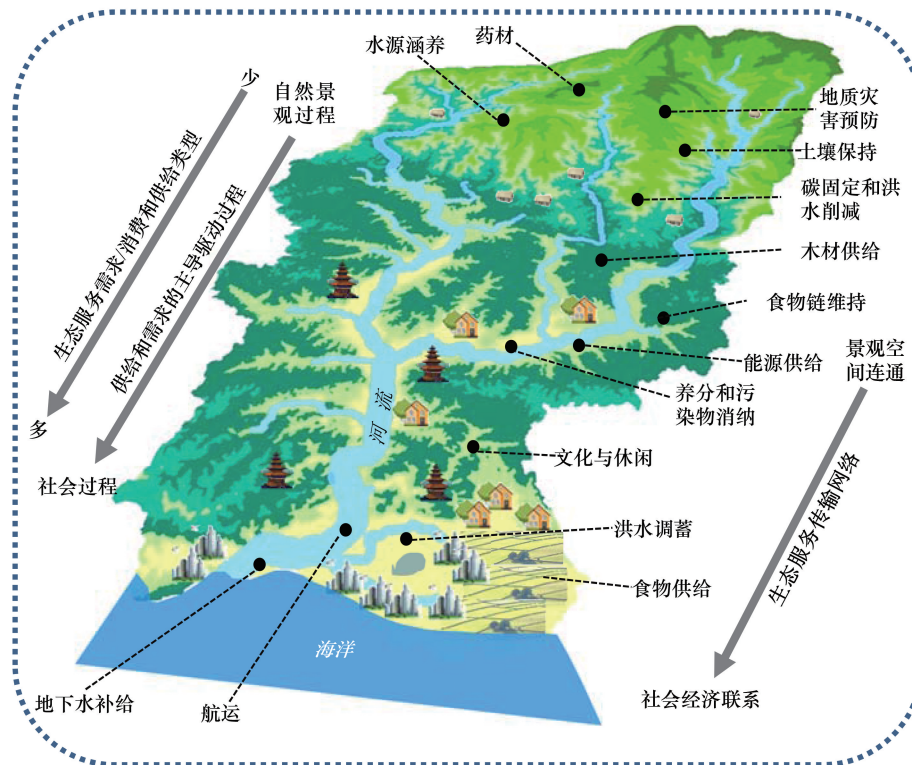


图 4 河流生态服务供给与需求/消费及其耦合的空间变异

Fig.4 Spatial variation of ecosystem service supply demand/consumption and their coupling in river landscape

人类在消费生态服务的过程中也会通过个体和社会尺度的景观干预改变生态服务供给能力,因而生态服务供给与消费的权衡关系是生态服务供给与需求/消费互馈的表征之一,也是流域管理决策的重要基础。一些文化、休闲类的生态服务的感知和评估^[58]以及它们的供给和消费之间的关系尚未充分掌握。在当前的生态系统服务研究中主要基于对象变量在数量上的此消彼长来表达生态服务项权衡与协同等机制,缺少从过程机理上给与阐释。生态服务的供给和需求/消费很大程度上与受益者所处的景观位置紧密相关。如具有较大有效汇水面积的人工库塘需要上游提供的土壤保持服务较大,而由于具有较大的汇水面积,收到的土壤保持服务也较大,二者呈现一定的协同关系。由于生态服务项之间的空间共存是普遍现象,对某项生态服务的消费有时会对其他生态服务的供给能力造成削减,或者切断其他生态服务的传输路径^[59],如拦截泥沙捕获土壤物质补充土地肥力导致下游河道养分平衡的改变,进而影响生产力和食物网,上游造林和蓄水导致下游流量减少^[60]等。对生态服务供给和需求与消费之间的权衡和协同关系尚未有深入的探讨。这可导致在不同时期^[61]和不同空间尺度^[62]得到的生态系统服务项之间权衡和协同关系的不一致,引起对生态服务供给和消费之间关系的误解,从而对流域景观管理和可持续利用带来风险。

6 结论

河流景观系统本身是一个社会-生态系统,自然景观过程和社会经济过程高度耦合,共同驱动生态系统服务供给的形成和服务的传输,决定生态系统服务的需求和消费。当前在河流景观生态服务供给与需求/消费的互馈机理及其评估方法方面存在科学认知和工具的不足,需要在社会-生态系统的框架下,从景观结构和生态过程出发,融合景观生态过程和社会过程来深入认识河流景观系统的生态服务供给与人类对生态服务的需求/消费之间的互馈机制。针对河流景观生态服务供给与需求/消费时空失耦的普遍性,需要从生态服务供给和需求的格局及其动态刻画入手,基于景观生态过程和社会过程理解和表达生态服务从供给到满足需求

的转化过程。总而言之,需要强化基于社会-生态过程的生态服务供给和需求/消费时空异质性及其耦合机制的研究。景观结构和过程是生态服务功能形成的基础,在很大程度上决定了生态服务需求和消费的类型和数量,是生态服务供给和需求/消费时空异质性形成的重要驱动力。因此,未来研究首先应关注河流景观结构和过程驱动生态服务供给和消费的空间分异的机制。其次,河流生态服务传输依赖于众多自然和人文载体,未来的研究需要深入探究它们的时空格局及其耦合生态服务供给和需求/消费的机制,探究它们对外部驱动的非线性响应。鉴于目前生态服务相关的模型对社会-生态过程的表达不足,导致评估结果与现实感知的不符,不确定性高,未来研究需要加强基于生态服务供给与需求/消费通过社会-生态过程互馈的过程机制的模型研发,将生态服务需求/消费通过景观结构和生态过程反馈生态服务供给这一机制融入生态服务评估的方法框架,提高评估的准确性和可靠性。

参考文献(References):

- [1] Daily G C, Matson P A. Ecosystem services: From theory to implementation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9455-9456.
- [2] La Notte A, D'amato D, Mäkinen H, Paracchini M L, Liqueste C, Egoh B, Geneletti D, Crossman N D. Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 392-402.
- [3] Spangenberg J H, Von Haaren C, Settele J. The ecosystem service cascade: Further developing the metaphor. Integrating societal processes to accommodate social processes and planning, and the case of bioenergy. *Ecological Economics*, 2014, 104: 22-32.
- [4] 彭保发, 郑俞, 刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架. *地理科学*, 2018, 38(3): 361-367.
- [5] Aretano R, Petrosillo I, Zaccarelli N, Semeraro T, Zurlini G. People perception of landscape change effects on ecosystem services in small Mediterranean islands: A combination of subjective and objective assessments. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 112: 63-73.
- [6] 张雷, 鲁春霞, 李江苏. 中国大河流域开发与国家文明发育. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(10): 1639-1645.
- [7] Wantzen K M, Ballouche A, Longuet I, Bao I, Bocoum H, Cissé L, Chauhan M, Girard P, Gopal B, Kane A, Rosa Marchese M, Nautiyal P, Teixeira P, Zalewski M. River culture: an eco-social approach to mitigate the biological and cultural diversity crisis in riverscapes. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2016, 16(1): 7-18.
- [8] Thiele J, Von Haaren C, Albert C. Are river landscapes outstanding in providing cultural ecosystem services? An indicator-based exploration in Germany. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 31-40.
- [9] Yeakley J A, Ervin D, Chang H, Granek E F, Dujon V, Shandas V, Brown D. Ecosystem services of streams and rivers // Gilvear D J, Greenwood M T, Thoms M C, Wood P J, eds. *River Science: Research and Management for the 21st Century*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- [10] Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 7-21.
- [11] 赵彦伟, 杨志峰. 河流健康: 概念、评价方法与方向. *地理科学*, 2005, 25(1): 119-124.
- [12] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [13] Fang X N, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y. Landscape service capability, landscape service flow and landscape service demand: A new framework for landscape services and its use for landscape sustainability assessment. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2015, 39(6): 817-836.
- [14] 熊剑, 喻方琴, 田琪, 黄代中, 李利强. 近 30 年来洞庭湖水质营养状况演变特征分析. *湖泊科学*, 2016, 28(6): 1217-1225.
- [15] Kondolf G M, Pinto P J. The social connectivity of urban rivers. *Geomorphology*, 2017, 277: 182-196.
- [16] 王立新, 刘华民, 刘玉虹, 梁存柱, 王炜, 刘东伟, Recknagel F. 河流景观生态学概念、理论基础与研究重点. *湿地科学*, 2014, 12(2): 228-234.
- [17] Peipoch M, Brauns M, Hauer F R, Weitere M, Valett H M. Ecological Simplification: Human Influences on Riverscape Complexity. *BioScience*, 2015, 65(11): 1057-1065.
- [18] Thorp J H, Flotemersch J E, Delong M D, Casper A F, Thoms M C, Ballantyne F, Williams B S, O'Neill B J, Haase C S. Linking ecosystem services, rehabilitation, and river hydrogeomorphology. *BioScience*, 2010, 60: 67-74.
- [19] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦. 大坝对下游景观格局及生态系统服务的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 240-247.
- [20] Beechie T J, Sear D A, Olden J D, Pess G R, Buffington J M, Moir H, Roni P, Pollock M M. Process-based Principles for Restoring River Ecosystems. *BioScience*, 2010, 60(3): 209-222.
- [21] Loomis J, Kent P, Strange L, Fausch K, Covich A. Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: results from a contingent valuation survey. *Ecological Economics*, 2000, 33(1): 103-117.

- [22] Hauck J, Winkler K J, Priess J A. Reviewing drivers of ecosystem change as input for environmental and ecosystem services modelling. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 2015, 5: 9-30.
- [23] Vermaat J E, Wagtendonk A J, Brouwer R, Sheremet O, Ansink E, Brockhoff T, Plug M, Hellsten S, Aroviita J, Tylec L, Gielczewski M, Kohut L, Brabec K, Haverkamp J, Poppe M, Böck K, Coerssen M, Segersten J, Hering D. Assessing the societal benefits of river restoration using the ecosystem services approach. *Hydrobiologia*, 2016, 769(1): 121-135.
- [24] Gunderson L H, Cosens B, Garmestani A S. Adaptive governance of riverine and wetland ecosystem goods and services. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183: 353-360.
- [25] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1957, 38(6): 913-920.
- [26] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 曹淑艳, 肖玉. 生态系统服务的供给、消费和价值化. *资源科学*, 2008, 30(1): 93-99.
- [27] Ma S, Smailes M, Zheng H, Robinson B E. Who is Vulnerable to Ecosystem Service Change? Reconciling Locally Disaggregated Ecosystem Service Supply and Demand. *Ecological Economics*, 2019, 157: 312-320.
- [28] 王大尚, 郑华, 欧阳志云. 生态系统服务供给、消费与人类福祉的关系. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1747-1753.
- [29] Machado A C M, Veról A P, Battemarco B P, Miguez M G. Proposal of a complementary tool to assess environmental river quality: The River Classification Index (RCI). *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120000.
- [30] Fullerton A H, Burnett K M, Steel E A, Flitcroft R L, Pess G R, Feist B E, Torgersen C E, Miller D J, Sanderson B L. Hydrological connectivity for riverine fish: measurement challenges and research opportunities. *Freshwater Biology*, 2010, 55(11): 2215-2237.
- [31] Wang F, Mu X M, Li R, Fleskens L, Stringer L C, Ritsema C J. Co-evolution of soil and water conservation policy and human-environment linkages in the Yellow River Basin since 1949. *Science of The Total Environment*, 2015, 508: 166-177.
- [32] González-García A, Palomo I, González J A, López C A, Montes C. Quantifying spatial supply-demand mismatches in ecosystem services provides insights for land-use planning. *Land Use Policy*, 2020, 94: 104493.
- [33] Burkhard B, Kroll F, Müller F, Windhorst W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services-a concept for land-cover based assessments. *Landscape Online*, 2009, 15: 1-22.
- [34] Hoetinghaus D J, Winemiller K O, Agostinho A A. Landscape-scale hydrologic characteristics differentiate patterns of carbon flow in large-river food webs. *Ecosystems*, 2007, 10(6): 1019-1033.
- [35] Polvi L E, Lind L, Persson H, Miranda-Melo A, Pilotto F, Su X L, Nilsson C. Facets and scales in river restoration: Nestedness and interdependence of hydrological, geomorphic, ecological, and biogeochemical processes. *Journal of Environmental Management*, 2020, 265: 110288.
- [36] Jain V, Tandon S K. Conceptual assessment of (dis)connectivity and its application to the Ganga River dispersal system. *Geomorphology*, 2010, 118(3-4): 349-358.
- [37] Fryirs K. (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(1): 30-46.
- [38] Fryirs K A, Brierley G J, Preston N J, Kasai M. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena*, 2007, 70(1): 49-67.
- [39] Cammeraat E L H. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104(2): 317-332.
- [40] Peñafla A, Javaux M, Biélders C L. Scale effect on overland flow connectivity at the plot scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17: 87-101.
- [41] Zhang L-T, Li Z-B, Wang S-S. Spatial scale effect on sediment dynamics in basin-wide floods within a typical agro-watershed: A case study in the hilly loess region of the Chinese Loess Plateau. *Science of The Total Environment*, 2016, 572: 476-486.
- [42] Böck K, Muhar S, Muhar A, Polt R. The ecosystem services concept: Gaps between science and practice in river landscape management. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 2015, 24(1): 32-40.
- [43] Macfarlane W W, Wheaton J M, Bouwes N, Jensen M L, Gilbert J T, Hough-Snee N, Shivik J A. Modeling the capacity of riverscapes to support beaver dams. *Geomorphology*, 2017, 277: 72-99.
- [44] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 魏彦昌. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 443-452.
- [45] 魏国良, 崔保山, 董世魁, 杨志峰. 水电开发对河流生态系统服务功能的影响——以澜沧江漫湾水电工程为例. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 235-242.
- [46] 蔡庆华, 唐涛, 刘建康. 河流生态学研究中的几个热点问题. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1573-1577.
- [47] 庄大昌. 洞庭湖湿地生态系统服务功能价值评估. *经济地理*, 2004, 24(3): 391-394, 432-432.

- [48] Chisholm R A. Trade-offs between ecosystem services: Water and carbon in a biodiversity hotspot. *Ecological Economics*, 2010, 69: 1973-1987.
- [49] Hermann A, Schleifer S, Wrba T. The Concept of Ecosystem Services Regarding Landscape Research: A Review. *Living Reviews in Landscape Research*, 2011, 5(5): 1.
- [50] West A. Core Concept: Ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(24): 7337-7338.
- [51] Burkhard B, Kandziora M, Hou Y, Müller F. Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification. *Landscape Online*, 2014, 34: 1-32.
- [52] Koopman K R, Augustijn D C M, Breure A M, Lenders H J R, Leuven R S E W. Suitable landscape classification systems for quantifying spatiotemporal development of riverine ecosystem services. *Freshwater Science*, 2018, 37(1): 190-204.
- [53] Hernández-Morcillo M, Plieninger T, Bieling C. An empirical review of cultural ecosystem service indicators. *Ecological Indicators*, 2013, 29: 434-444.
- [54] Nassl M, Löffler J. Ecosystem services in coupled social-ecological systems: Closing the cycle of service provision and societal feedback. *Ambio*, 2015, 44(8): 737-749.
- [55] Costanza R. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350-352.
- [56] 陈鹏. 厦门湿地生态系统服务功能价值评估. *湿地科学*, 2006, 4(2): 101-107.
- [57] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统模型研究进展. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 352-358.
- [58] Zander K K, Garnett S T, Straton A. Trade-offs between development, culture and conservation e Willingness to pay for tropical river management among urban Australians. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(12): 2519-2528.
- [59] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, Villa F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [60] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2015, 9: 38-41.
- [61] Tomscha S A, Gergel S E. Ecosystem service trade-offs and synergies misunderstood without landscape history. *Ecology and Society*, 2016, 21(1): 43.
- [62] Roces-Díaz J V, Vayreda J, Banqué-Casanovas M, Díaz-Varela E, Bonet J A, Brotons L, De-Miguel S, Herrando S, Martínez-Vilalta J. The spatial level of analysis affects the patterns of forest ecosystem services supply and their relationships. *Science of The Total Environment*, 2018, 626: 1270-1283.