DOI: 10.5846/stxb201807271605

王嘉丽,周伟奇.生态系统服务流研究进展与趋势展望.生态学报,2019,39(12): - .

Wang J L, Zhou W Q. Ecosystem service flows: Recent progress and future perspectives. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): - .

生态系统服务流研究进展与趋势展望

王嘉丽¹, 周伟奇^{1,2,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:生态系统服务流是实现生态系统服务供给与人类需求耦合的重要桥梁,是当前生态系统服务研究的热点与前沿。科学理解生态系统服务从产生、传递到使用的全过程,明确区域生态系统服务供给与需求的平衡状况,对于实现区域可持续发展与提高人类福祉具有重要意义。在综合分析国内外相关研究的基础上,阐述了生态系统服务流的概念内涵,归纳总结了生态系统服务流的定量研究方法,并系统梳理了国内外生态系统服务流研究在理论探索与应用案例方面的研究进展;探讨了当前生态系统服务流研究中存在的问题和不足,包括:生态系统服务从供给区传递至需求区的空间转移规律尚不明晰、定量评估生态系统服务流的方法不成熟、面向应用的生态系统服务流的研究较为缺乏,以及人与自然耦合系统中生态系统服务流研究框架有待进一步完善。未来的研究需要重点关注复杂系统中生态系统服务流跨尺度、跨区域的传递过程,加强生态系统服务的空间流动过程与传递路径的定量分析与模拟,重视生态系统服务流的应用性研究,尤其是在生态恢复、生态补偿、城市规划等方面的应用,并完善人与自然耦合系统中生态系统服务流的研究框架,以期促进生态系统服务流研究的发展。

关键词:生态系统服务流;生态系统服务供需;人类福祉;生态系统管理

Ecosystem service flows: Recent progress and future perspectives

WANG Jiali¹, ZHOU Weiqi^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Ecosystem service flows have increasingly been a hot topic in recent years, as it serves as an important bridge connecting ecosystem services supply and human demand. Research on ecosystem service flows contributes to our understanding of the completed delivery processes of ecosystem services and analyzes the relationship between ecosystem services supply and demand. It has great significance for achieving regional sustainable development and improving human well-being. Based on the comprehensive analysis of relevant studies, this paper described the concept of ecosystem service flows and summarized the approaches for quantifying ecosystem service flows. Following that, the research progress from both theoretical and applied aspects was systematically reviewed. In addition, the shortcomings of recent studies were summarized. These include: 1) the ecosystem services delivery process from supply areas to demand areas has not been fully explored; 2) the method of quantitative assessment of ecosystem service flows needs to be improved; 3) research on integrating the concept of ecosystem service flows into practical application was relatively rare; and 4) the research framework of ecosystem service flows in the coupled human and environmental systems needs improvement. Furthermore, four research perspectives were proposed, including exploration of the ecosystem services delivery processes in the complex system, developing spatially distributed models to simulate the delivery process and delivery path of ecosystem services,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41771203);科技部国家重点研发计划项目(2016YFC0503004)

收稿日期:2018-07-27; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhou@cees.ac.cn

applying the concept of ecosystem service flows into ecological restoration, ecological compensation, and urban planning, and improving the research framework of ecosystem service flows. These prospects and reviews were expected to serve as a reference for research of ecosystem service flows and provide a scientific foundation for regional planning and sustainable development.

Key Words: ecosystem service flows; ecosystem services supply and demand; human well-being; ecosystem management

生态系统服务(Ecosystem services)是人类直接或间接从生态系统中获得的各种产品与惠益^[1],与人类福祉密切相关,是人类生存与发展的基础^[2]。生态系统服务既包括生态系统为人类提供的物质产品,也包括维持人类生存和发展所需的各种环境条件与效用,如清新的空气、清洁的水源等。受矿产资源开发、城市化等高强度人类活动长期干扰的影响,在全球、区域和局地等多个尺度,生态系统的结构和功能发生了巨大的变化,生态系统退化严重,提供服务的能力下降,对生态安全及人类可持续发展产生了重要的影响^[3]。生态系统服务是当前生态学与环境管理研究的焦点^[4],众多的学者围绕生态系统服务,开展了大量的研究。同时,生态系统服务的研究也受到诸多国际组织的广泛关注,包括生物多样性和生态服务跨政府间科学政策平台,未来地球计划等,都将生态系统服务作为其研究的核心主题。

自千年生态系统服务评估以来,全球范围内掀起了生态系统服务研究的热潮,并在生态系统服务制图、价值评估和形成机制,多种类型生态系统服务之间的权衡协同关系、以及生态系统服务与人类福祉等多个方面,取得了较大的进展^[5-8]。不足之处是大多数研究主要关注生态系统服务的供给,缺乏对人类社会的需求的考虑^[9-10]。然而,生态系统服务的实现依赖于生态系统与社会经济系统的相互作用与反馈^[11],只有综合考虑自然生态系统提供服务的能力与人类社会对服务的需求^[12],才能更有效地揭示生态系统服务与人类福祉之间的关系。近年来,部分学者从不同尺度对多种生态系统服务类型的供给与需求进行了研究^[13-14],揭示了生态系统服务供给与需求在空间上存在不匹配的特征,意味着存在生态系统服务从供给区到需求区的传递过程。生态系统服务流研究可以将具有空间异质性的供给与需求有效连接,已受到众多研究者的广泛关注。虽然当前对生态系统服务流的研究还处于概念性探索阶段,其定量评估的方法也尚未成熟,但相关的研究已经成为生态系统服务研究的热点与前沿,是未来发展的一个重要方向^[15]。

生态系统服务流的研究,有助于明晰生态系统对人类生存与发展所需的各种产品与服务的供给能力,以及生态系统服务供给与需求时空分布特征,并明确生态系统服务对人类社会需求的满足程度,识别产品与服务在自然生态系统与人类社会经济系统之间传递的路径,辨识影响生态系统服务传递的关键区位,从而可以为制定合理的生态系统管理政策与生态补偿方案等提供依据,对实现可持续发展与保障区域生态安全具有重要的意义。

本文在综合分析当前国内外生态系统服务流研究的基础上,从生态系统服务流的概念内涵出发,概述了生态系统服务流定量研究的方法,并对当前国内外生态系统服务流的研究进行梳理与总结。在此基础上,进一步提出了当前生态系统服务流研究中存在的问题与挑战,并对未来的研究方向进行了展望,以期从理论与应用两个方面,推动生态系统服务流研究的发展。

1 生态系统服务流的内涵

目前,对生态系统服务流的定义,学术界尚未达成共识,不同研究者对生态系统服务流的认识有所不同。概括起来,主要从两个角度来定义和理解,其一强调过程,认为生态系统服务流是生态系统从供给区到需求区的连接^[15-16],是供给区所提供的生态系统服务依靠某种载体或不经任何载体,在自然或人为因素的驱动下,沿某一方向和路径传递到受益区的过程^[10-11]。其二强调最终的效用,认为生态系统服务流为人类实际所获得的生态系统服务,是生态系统服务的最终实现^[17-18]。这两种理解虽然存在差异,但是两者关注的对象一

致,都是生态系统所产生的服务中被人类所消耗利用的部分^[15]。

生态系统服务流研究将自然生态系统与人类社会系统连接起来,其研究的主要内容是探索生态系统服务由供给区到需求区的空间转移过程。大多数生态系统服务流的实现涉及到三个区域,供给区、连接区与需求区^[19]。生态系统服务供给区是产生生态系统服务的区域,生态系统服务连接区是连接生态系统服务供给与需求的中间区域,生态系统服务需求区是使用或消费生态系统服务的区域^[20]。某些生态系统服务流传递过程中还会涉及“汇”区域,其对生态系统服务从供给区至需求区的传递过程形成阻碍,致使达到需求区的服务流量减少,甚至截留生态系统服务,使其不能顺利传递至特定的需求区,如修建大坝等水利基础设施对水资源在上下游之间流动过程中形成的阻碍^[21]。依据生态系统服务供给区与需求区之间的空间关系,生态系统服务流可以分为三种类型:原位服务流、全向服务流和定向服务流^[22]。原位服务流是指生态系统服务供给区与需求区基本重叠,服务的实现无需空间上的转移,如土壤的形成;全向服务流是生态系统服务从供给区沿各个方向传递到使用区,其传递过程中没有方向偏好,如以空气流动为传播媒介的空气质量调节等服务;定向服务流是生态系统服务从供给区沿某一固定方向传递到服务使用区,如淡水供给服务与洪水调控等。理解生态系统服务在供给区与需求区之间的空间关系是进行生态系统服务流研究的基础。

生态系统服务流具有时空特征、载体特征与量化属性特征^[18-19]。生态系统服务流具有尺度依赖性,不同生态系统服务类型所具有的时间尺度与空间尺度不同,且随着社会经济的发展生态系统服务供需及其传递过程也会随之发生变化。时空尺度的测定对于准确定量评估生态系统服务流具有重要意义。生态系统服务从供给区传递至受益区的过程需要依靠某种载体或者工具才能实现,如区域间热力差异引起的空气流动是气候调节服务的重要载体,交通工具是农、林产品等由生产地运送至需求区实现供给服务流传递的一种重要载体。有些载体本身也是一种生态系统服务,如水流不仅是生态系统中物质与能量传递的重要通道,而且其自身也作为一种重要的生态系统服务类型满足人类的需求,如为人类提供饮用水^[18]。生态系统服务流具有流向、流速与流量 3 种属性特征,生态系统服务流的流向是生态系统服务从供给区至需求区的传递方向,通常受载体的影响,如水流流向会受地形等因素的影响。生态系统服务流的流速是生态系统服务传递距离与传递时间的比值,其受多种因素的影响,如随着交通运输条件日益便利,供给服务在生产地与消费地之间的传输速度大幅增加。生态系统服务的流量是受益区实际所接收到的生态系统服务量,生态系统服务从供给区传递至受益区过程中基本遵循距离衰减规律,随着供给区与受益区距离增加,受益区所接受到的生态系统服务流量递减^[16,18]。生态系统服务流流量的确定是量化生态系统服务流的根本所在^[19]。

2 生态系统服务流的研究方法

目前生态系统服务流研究中应用最多的方法可以分为两类,其一为利用空间分布式模型对生态系统服务的供给与需求、传递路径及传递过程进行量化分析与制图分析。其二主要是对生态系统服务从生产到消费过程中,受益方所接受到的生态系统服务量的评估^[15](表 1)。

表 1 生态系统服务流研究方法概况

Table 1 Methods of quantifying and mapping ecosystem service flows

研究方法 Research method	理论基础 Theoretical basis	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
空间分布式模型 Spatial distributed models	强调过程,明确生态系统服务从供给区到需求区传递过程中传递路径、流向、流量等属性	空间直观地反映生态系统服务传递的过程	生态系统服务传递过程较为复杂,且需要大量数据
生态系统服务量评估 Assessment of the realized ecosystem services	强调效用,量化人类实际利用的生态系统服务	易于度量,探索生态系统服务供需平衡状况,识别需求未被满足的区域	无法揭示生态系统服务传递过程机制

通过空间分布式模型描绘生态系统服务流动路径,模拟生态系统服务的空间流动过程是生态系统服务流研究的重要发展方向。许多学者借助多种模型对生态系统服务流动过程进行了探索。如 Bagstad 等^[16]基于生态系统服务人工智能模型(Artificial Intelligence for Ecosystem Services, ARIES)利用贝叶斯网络分析生态系统服务从供给区至需求区的传递过程,并构建“服务路径属性网络”(Service Path Attribution Networks, SPANs)以模拟生态系统服务的空间传递过程与流动路径。李婷等基于贝叶斯网络方法对关中-天水经济区生态系统固碳服务的空间流动路径进行模拟^[23]。Li 等利用水文模型从格网尺度与行政区尺度对京津冀地区水源供给服务流进行研究,揭示了水源供给服务从供给区至需求区的传递路径^[24]。Xu 等利用混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, HYSPLIT)模拟了宁夏自治区盐池县防风固沙服务的传递路径^[25]。这种方法通过空间分布式模型直观反映生态系统服务从供给区到需求区传递过程中传递路径、流向、流量等属性,明确生态服务传递过程机制,是当前生态系统服务流研究的主要工具^[26]。但是生态系统服务传递过程较为复杂,其涉及到多种生物因子与非生物因子的综合作用,模型模拟过程中需要考虑多种影响因子,需要大量的参数,生态系统服务流传递过程模拟存在一定的挑战。

生态系统服务量评估方法主要通过通过对生态系统服务供给、生态系统服务流及需求的空间分布格局及其服务量进行识别与量化,用以分析生态系统服务供需平衡状况。如 Serna-Chavez 等^[10]从不同尺度选取授粉、地下水供给以及气候调节服务,对各类型生态系统服务供给区、服务辐射范围及需求区的空间位置进行识别,分析供给区与需求区之间的空间联系,并引入供需比指标来探索生态系统服务流。Palomo 等^[27]利用专家评价方法对西班牙多尼亚那国家公园与周围地区的供给、调节与文化多种服务类型的供给-需求流进行了分析。Bagstad 等^[28]以美国华盛顿州普吉特海湾地区为例,选取固碳、洪水调节、泥沙截留等五种生态系统服务类型,通过对各类型生态系统服务理论供给量、实际供给量以及实际供给量与理论供给量的比率来分析生态系统服务流。Baro 等^[28]以西班牙巴塞罗那市为研究区,对空气净化与户外休闲服务的供给、需求以及服务流进行量化与制图分析,明确生态系统服务未被满足的区域。在生态系统服务供给、需求及生态系统服务流量化研究中,基于 LUCC 的生态系统服务供需关系矩阵法,将土地利用/土地覆盖视为分析生态系统服务供给与需求的替代指标,依据专家评价方法,结合研究区实际情况,对不同土地利用类型所提供的生态系统服务的供给量与需求量进行打分,通过分析特定地区供给与需求得分之间的差异来量化生态系统服务流^[29]。此方法简单,易于实现,并且所需数据量较少,目前已经得到了广泛的应用。如 Owuor 等与 Vreboos 等利用基于土地利用的生态系统服务供给与需求得分矩阵,借助专家评判方法分别对非洲肯尼亚与乌干达地区的生态系统服务流进行量化研究与制图分析^[30-31]。这种方法易于度量,但是其只对供给量、需求量及实际所获得的生态系统服务量进行评估,分析生态系统服务供需平衡状况,无法揭示生态系统服务传递过程机制^[15]。基于 LUCC 的生态系统服务供需关系矩阵方法较为主观,受专家偏好与认知的影响较大,一定程度上会影响研究结果的精确性^[5]。

此外,许多研究者也尝试将其他领域范围内应用较成熟的方法引入到生态系统服务流研究中,如李婧昕等以北京市为例,基于统计数据,利用熵理论方法对北京城市生态系统服务流进行了定量评估^[32]。乔旭宁等通过分析流域尺度生态系统服务空间转移特征,基于场强理论与断裂点模型构建了流域生态系统服务空间转移模型,并分析了生态系统服务空间流动与居民福祉之间的因果联系^[33]。

3 生态系统服务流研究进展

生态系统服务流的研究是生态系统服务研究的一个重要方向,也是当前国内外研究的热点和前沿。但是目前对生态系统服务流的研究仍处于起步阶段。已有的研究主要集中在对生态系统服务流理论、方法的探索,与应用案例的研究。总体而言,对生态系统服务流的研究,还处于早期的探索性阶段。

3.1 生态系统服务流理论与方法探索研究

目前生态系统服务流理论与方法方面的探索主要集中在对生态系统服务流的概念与内涵的研究,侧重生

态生态系统服务供给、需求以及生态系统服务从供给区到需求区的空间联系等方面。现有的研究主要集中在以下三个方面:(1)生态系统服务流研究理论基础的探索。生态系统服务流包括对供给能力、传递过程及需求的研究。许多研究针对生态系统服务流传递过程中所涉及的关键组分,对生态系统服务供给、生态系统服务流与生态系统服务需求等概念内涵进行区分^[26,29,34]。生态系统服务的供给分为潜在供给与实际供给,潜在供给是生态系统基于自身生态属性与生态功能,所提供某种生态系统服务的供给潜力^[34],实际供给是人类实际使用的产品或服务^[29]。通常在研究中,学者们将生态系统服务的实际供给与生态系统服务流等同起来^[19]。生态系统服务需求是人类社会所使用或消费的产品与服务^[34],或者为满足某种需求期望获得的生态系统服务量^[11]。(2)生态系统服务流研究的理论框架。许多研究者对生态系统服务流的研究框架进行了探索^[20,35],基于不同的出发点,提出了不同的理论框架。如 Villamagna 等通过分析生态系统服务流传递过程中所涉及的关键组分,即生态系统服务的潜在供给能力、生态压力、需求以及生态系统服务流,提出了生态系统服务流研究的框架与量化评价生态系统服务流的方法^[11]。Liu 等从生态系统服务流产生的原因,生态系统服务流过程中涉及到的传递主体(源地、目的地)、生态系统的服务流的影响等多个方面着手,通过建立因果反馈联系,提出了人与自然耦合系统中远程生态系统服务流传递过程框架^[36]。此外,生态系统所提供服务的的功能不仅依赖于生态系统服务流的空间属性^[21],且与利益相关者密切相关。Felipelucia 等综合考虑生态系统服务与利益相关者之间的相互作用关系,从生态系统服务流传递过程中的复杂关系出发,提出了生态系统服务研究的框架^[37]。这些生态系统服务流的研究框架不仅关注生态系统服务供给、需求及在供给方与需求方之间的传递过程,而且也关注人类社会系统,探索生态系统服务传递过程产生的影响及其溢出和反馈作用。(3)量化研究生态系统服务流的步骤。量化研究生态系统服务流,剖析生态系统服务流在传递过程中流量、流向等关键因素的变化也是生态系统服务流基础理论研究的重要内容。Bagstad 等在分析生态系统服务流动过程中源、汇、载体、受益者等因素的基础上,提出了量化生态系统服务流的方法^[16]。Serna-Chavez 等在分析供给方、受益方及其空间联系的基础上,提出了定量分析生态系统服务流的通用框架^[10]。国内学者姚婧等与刘慧敏等也对生态系统服务量化研究的方法与分析步骤进行了介绍^[15,19],推动了对生态系统服务流的定量研究。

3.2 生态系统服务流应用案例研究

生态系统服务流的理论和方法探讨,尤其是模型方法的发展,也推动了相关案例研究的开展。其中,因为在生态系统物质能量流动过程中扮演重要角色,物种迁徙受到了广泛的关注。例如,Bagstad 等与 Semmens 等以尖尾鸭和黑脉金斑蝶为例,引入了空间补贴(Spatial subsidies)的概念——物种在长距离迁徙过程中跨越不同区域所提供生态系统服务的变化,定量分析了这两个物种在美洲范围内迁徙过程中生态系统服务流的变化,可为跨区域生态保护提供建议^[38-39]。此外,水源供给、雨洪调节以及文化服务流方面的研究也相对较多。如 Li 等以京津冀地区为例,利用水文分析方法从格网尺度与城市尺度对淡水供给服务的供需平衡状况进行分析,探讨不同尺度淡水生态系统服务的流动路径,并基于研究结果对区域水安全格局进行了评价^[24]; Goldenberg 等以瑞典斯德哥尔摩为例,选取了局地气候调节与城市雨洪调节服务,通过对生态系统服务潜在供给-需求与实际供给-需求的度量与分析,基于生态系统服务流的方法对城市生态系统服务进行了定量地研究^[40]。Lankia 等与 Egarter 等通过分析生态系统服务潜在供给、实际供给(流)、需求以及生态系统服务的供需关系分别对芬兰与意大利国家公园的文化娱乐服务流进行了评价^[41-42]。李婷等以关中-天水地区为研究区,采用多元数据模型评估固碳服务的供给与需求,以空间可视化的方式描绘固碳服务从供给区到受益区的传递过程,并依据固碳服务供需平衡状态提出区域空间格局优化的策略^[23]。除了分析生态系统服务供给、需求以及传递过程的研究外,研究者也从产业生态的角度,对生态系统服务产出地、转移路径和受益者之间的空间映射关系进行了探索,如赵庆建等以林浆纸一体化为例,基于生态系统服务流的视角,对森林生态系统所产生的碳流和水流及其供需状况进行了分析^[43]。

将生态系统服务流应用于区域与城市规划也是研究的一个重要方向。许多学者从供给、调节、文化娱乐

等方面选取与研究区密切相关的生态系统服务类型,通过对生态系统服务的供给能力与生态系统服务流进行区分与量化,并识别生态系统服务供给与需求的平衡状态,进而为生态系统服务可持续管理提供建议^[17,28,44]。生态系统服务流研究也可以为生态恢复与保护项目的实施提供科学依据,如 Verhagen 等从生态系统服务需求和空间流的视角识别生态保护的优先地区,为区域尺度生态恢复提供建议指导^[45]。生态系统服务流研究也为合理制定生态补偿与生态付费等政策提供支撑,许多学者以世界上最长且最大的调水工程作为研究案例,分别从供给与需求的视角出发,在全面评估水源区生态系统服务的基础上,综合考虑沿线受益区的社会经济发展水平与调入水量等多种因素,提出水源区生态补偿的标准与分配机制^[46-48]。

4 生态系统服务流研究存在的不足与研究展望

近年来,生态系统服务流研究受到国内外学者的广泛关注,在概念探索与评估方法等方面取得了显著的进展。但其研究仍处于起步阶段,面临诸多的挑战。未来的工作需要加强生态系统服务流的理论内涵、定量方法以及应用等多个方面的研究。

4.1 研究不足

国内外学者开展了生态系统服务流的理论内涵与应用实践的探索性研究,提高了对生态系统服务流的理解与认知。但是总体而言,该领域的研究还处于起步阶段,在理论原理、评估方法与应用等方面仍存在诸多的不足。具体包括以下几个方面:

(1) 对生态系统服务空间转移的规律尚不明晰

探索生态系统服务在空间转移中的规律是生态系统服务流研究中的核心内容^[33,49]。生态系统服务供给与需求在空间上存在不匹配性,因此生态系统所产生的产品与服务需要通过空间上的流动过程传递至需求区以实现其服务的价值。该传递过程具有跨尺度、跨区域的特征,其尺度范围因生态系统服务类型不同而异,如空气净化、温度调节、休闲娱乐等服务通常作用于局地尺度^[40,42],影响的范围相对较小,洪水调节,水源供给等服务涉及到服务在上下游之间的传递^[14,24,50],通常作用于区域的尺度,而固碳服务影响的范围却可以波及区域、国家乃至全球的尺度^[36]。由于生态系统服务的传递涉及到自然生态与人类社会经济两大系统,传递过程比较复杂,且受多因素的影响,目前研究中对生态系统服务从供给区到需求区的传递的机理与规律不清晰,当前对生态系统服务流的研究主要集中在小尺度^[51],缺乏对生态系统服务流的跨尺度与跨区域的特征的认识。这在一定程度上限制了生态系统服务流研究的发展。

(2) 生态系统服务流量化评估方法尚不成熟

生态系统服务流涉及生态系统服务供给、需求、以及传递过程3个方面的研究。目前仅有生态系统服务供给的定量研究方法相对比较成熟,尤其是生物量、价值量以及评价模型等方面^[52-53]。生态系统服务需求的定量方法,尚不成熟^[54-55]。例如,由于对生态系统服务需求概念内涵缺乏统一的理解以及人类社会系统的复杂性,对生态系统服务需求的量化所采用的方法与指标并不一致^[49],可能导致评价结果存在很大的差异。此外,目前对生态系统服务流的定量方法仍然存在一些缺陷。如基于土地利用的生态系统服务供需关系矩阵评估方法比较主观,对专家的知识要求较高,得出的结果不一定符合生态系统服务实际的供需状况^[56]。利用空间分布式模型对生态系统服务传递过程与传递路径进行模拟,是生态系统服务流研究的一个重要方向^[26]。但是当前对这一领域的研究处在起步阶段,各类型生态系统服务从供给区到需求区的传递过程的量化,缺乏成熟的模型,尤其缺乏流动过程比较复杂的调节服务流的流动路径、流量以及流动过程中流量的消耗等方面的模型。已有的模型,例如 ARIES 模型和 SPANs 模型,虽然可以实现在空间上绘制生态系统服务的供给与需求,对生态系统服务从供给到需求传递过程中的流量与流动路径进行分析^[16],但是模型目前仍在开发阶段,且在运行过程中需要大量的参数,尚未得到广泛的应用^[26]。

(3) 面向应用的生态系统服务流的研究较少

生态系统服务研究的一个重要目标是将生态系统服务的概念应用于指导规划与制定相关的决策^[57]。通

过揭示生态系统服务流动过程及生态系统服务供给与需求的平衡状况,可为科学制定合理的生态系统管理措施与优化区域景观格局提供支撑,是实现区域可持续发展的关键。目前生态系统服务流的研究主要关注其概念与理论内涵,以及研究框架^[10-11,21],缺乏面向应用的研究。已有的应用性研究主要聚焦于淡水供给、动物迁徙、旅游休憩等,这类研究供给量和需求量相对容易量化,而对水源涵养、土壤保持等调节服务及其他类型服务的应用案例尚不多见^[34,41]。尤其对城市这种生态系统服务供给与需求矛盾日益突出的地区,生态系统服务流的研究很少,缺乏对城市地区温度调节、雨洪调节、城市绿地休闲娱乐等直接与城市居民生活相关的生态系统服务流的研究。

(4) 人与自然耦合系统中生态系统服务流研究框架有待完善

基于生态系统服务供给、需求及其相互联系的生态系统服务流研究框架^[11,58-59],是当前生态系统服务流研究的范式。不足之处是,这些研究框架主要关注对研究方法与内容的解释^[11,34],如通过综合考虑生态系统服务的潜在供给能力、生态压力、利益相关的需求,从供给方、受益方及其空间联系着手,定量分析生态系统服务流^[10-11]。这些框架虽然考虑了人类社会经济系统中利益相关者的需求,但是由于对人与自然耦合系统中生态系统服务流传递机制及流动规律的理解尚存在欠缺,较少考虑生态系统服务供给与需求之间复杂的反馈机制,缺乏完善的框架将生态系统管理与调控纳入至生态系统服务流的研究中,从而一定程度上制约了生态系统服务流应用于可持续生态系统管理研究的进程。

4.2 研究展望

研究生态系统服务从供给区到需求区的传递过程,识别生态系统服务流传递过程中的关键节点,可为生态恢复与生态补偿提供依据;探讨生态系统服务供给与需求平衡状况,可为景观规划与生态系统管理提供建议,是实现可持续发展与保障区域生态安全的重要途径。但是生态系统服务流的研究比较复杂,涉及对自然生态系统与人类社会系统中多种要素的分析。未来研究中需要加强以下几个方面研究,以期进一步推进生态系统服务流研究的发展。

(1) 重点关注复杂系统中生态系统服务流的传递过程

理解生态系统服务从供给区到需求区的传递过程是认识生态系统服务流最关键的环节。针对生态系统服务流传递过程的复杂性与跨尺度性,未来研究中应该从生态系统服务传递过程中流量,流向及流速变化以及不同类型生态系统服务的作用方向与供给范围等方面出发,分析生态系统服务在传递过程中对其所涉及的区域产生的影响,揭示生态系统服务在传递过程中的损耗与衰减规律,实现对跨区域、跨尺度的生态系统服务空间转移规律的探索。

(2) 加强生态系统服务流定量方法的研究

定量模拟分析生态系统服务的空间流动过程与传递路径,是未来生态系统服务空间流动的一个重要研究方向。未来的研究需要充分利用遥感影像、地理数据、地面调查、社会经济调查等多源数据库^[26],综合考虑地形地貌、植被、土壤以及土地利用等影响生态系统服务供需异质性的关键要素,确定生态系统服务供给者与需求者的空间分布特征。加强多学科之间的合作与交流,综合地理学、生态学、水文学、计算机科学以及社会学等多种学科,通过学科交叉互补,综合各类专业知识建立量化研究生态系统服务流的动态评估模型与模拟工具^[60]。

(3) 重视生态系统服务流的应用性研究

生态系统服务流的研究是生态系统服务评估的基础^[16],可为生态系统管理与景观格局优化提供科学依据,具有重要的实践价值。未来生态系统服务流的研究,应该加强面向应用的基础研究,将生态系统服务流的概念应用于生态系统管理、生态恢复,生态补偿,以及城市景观规划等决策的制定中。具体来说,主要包括以下几个方面: 1) 加强对生态系统服务从供给区到需求区传递过程中传递路径及生态系统服务流量的损耗与积累过程的研究,明确被破坏、受损和阻断的生态系统服务流,识别生态恢复与生态保护过程中的重点与优先区域,为制定科学合理的生态修复与生态管理措施提供科学依据^[45]。 2) 加强景观尺度及区域尺度生态系统

服务流的研究,明确生态系统服务在较大空间范围内的流动和转移规律,量化各受益方所接受的生态系统服务量,从而为生态补偿的标准量化提供依据^[61-62]。3) 关注对城市生态系统服务流的研究,聚焦于与城市居民生活息息相关的生态系统服务类型,加强生态系统服务供给与需求的研究,基于供需平衡视角,为城市景观规划与生态安全格局构建提供合理建议^[63]。

(4) 完善生态系统服务流研究框架

通过生态系统服务流的研究,基于对生态系统服务供给与需求平衡关系的探讨,进行生态系统管理与调控是生态系统服务流研究的重要内容,也是生态系统服务研究的重要目标。未来的研究需要在分析生态系统服务流传递过程中各要素综合作用及其驱动机制的基础上,明确人与自然耦合系统中,生态系统服务供给与需求之间复杂的因果-反馈机制,并将生态系统管理与调控纳入至生态系统服务流研究的框架中,以期通过分析生态系统服务流动过程中所涉及各要素的相互作用机制,为制定科学合理的管理政策提供依据,实现人与自然和谐发展。

5 结论

生态系统服务流为生态系统服务供给与人类需求搭建了桥梁,是探索生态系统服务与人类福祉相互作用的关键,也是当前生态系统服务研究的热点与前沿,对提高人类福祉,实现区域可持续发展,具有重要的意义。生态系统服务流研究旨在探索生态系统服务由供给区到需求区的空间传递过程,利用空间分布式模型对生态系统服务传递过程中流量动态变化与传递路径进行模拟,是生态系统服务流研究的一个重要方向,也是量化生态系统服务流的根本所在。推进生态系统服务流的研究,需要:1) 系统分析跨尺度、跨区域等复杂系统中生态系统服务流传递机理;2) 充分利用多种数据,加强多学科合作交流建立定量研究生态系统服务流的动态评估模型与模拟工具;3) 重视生态服务流的应用性研究,将生态系统服务流理念纳入生态补偿,生态恢复以及生态安全格局构建等决策制定过程。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] 傅伯杰, 吕一河, 高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展. *自然杂志*, 2012, 34(5): 261-272.
- [3] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. *地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.
- [4] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [5] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. *生态学报*, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [6] Liu S, Costanza R, Troy A, D'Aagostino J, Mates W. Valuing New Jersey's ecosystem services and natural capital: a spatially explicit benefit transfer approach. *Environmental Management*, 2010, 45(6): 1271-1285.
- [7] Maes J, Egoh B, Willems L, Liqueste C, Vihervaara P, Schägner J P, Grizzetti B, Drakou E G, La Notte A, Zulian G, Bouraouia F, Paracchini M L, Braat L, Bidoglio G. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 31-39.
- [8] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, Hou G H, Liu Y, Wang X F. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [9] Yahdjian L, Sala O E, Havstad K M. Rangeland ecosystem services: shifting focus from supply to reconciling supply and demand. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 13(1): 44-51.
- [10] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, Bouten W, Verburg P H, Davidson M D. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [11] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [12] Castro A J, Verburg P H, Martín-López B, García-Llorente M, Cabello J, Vaughn C C, López E. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: a landscape-scale spatial analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 102-110.

- [13] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [14] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 67-79.
- [15] 姚婧, 何兴元, 陈玮. 生态系统服务流研究方法最新进展. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 335-342.
- [16] 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.
- [17] Schröter M, Barton D N, Remme R P, Hein L. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: a conceptual model and a case study for Telemark, Norway. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539-551.
- [18] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流研究进展. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2161-2171.
- [19] 刘慧敏, 刘绿怡, 任嘉衍, 卞子元, 丁圣彦. 生态系统服务流量化研究进展. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2723-2730.
- [20] Syrbe R U, Walz U. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: Providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 80-88.
- [21] Bagstad K J, Villa F, Batker D, Harrison-Cox J, Voigt B, Johnson G W. From theoretical to actual ecosystem services: mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecology and Society*, 2014, 19(2): 64.
- [22] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [23] 李婷, 李晶, 王彦泽, 曾莉. 关中-天水经济区生态系统固碳服务空间流动及格局优化. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3953-3969.
- [24] Li D L, Wu S Y, Liu L B, Liang Z, Li S C. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [25] Xu J, Xiao Y, Xie G D, Wang Y Y, Jiang Y. How to guarantee the sustainability of the wind prevention and sand fixation service: an ecosystem service flow perspective. *Sustainability*, 2018, 10(9): 2995.
- [26] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. *生态学报*, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [27] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands: mapping ecosystem service flows. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 104-116.
- [28] Baró F, Palomo I, Zulian G, Vizcaino P, Haase D, Gómez-Baggethun E. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: a case study in the Barcelona metropolitan region. *Land Use Policy*, 2016, 57: 405-417.
- [29] 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): 1-12.
- [30] Owuor M A, Icelly J, Newton A, Nyunja J, Otieno P, Tuda A O, Oduor N. Mapping of ecosystem services flow in Mida Creek, Kenya. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 140: 11-21.
- [31] Vrebos D, Staes J, Vandembroucke T, D'Haeyer T, Johnston R, Muhumuza M, Kasabeke C, Meire P. Mapping ecosystem service flows with land cover scoring maps for data-scarce regions. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 28-40.
- [32] 李婧昕, 杨立, 杨蕾, 张超, 霍兆敏, 陈敏豪, 栾晓峰. 基于熵理论的城市生态系统服务流定量评估——以北京市为例. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 987-996.
- [33] 乔旭宁, 张婷, 杨永菊, 牛海鹏, 杨德刚. 渭干河流域生态系统服务的空间溢出及对居民福祉的影响. *资源科学*, 2017, 39(3): 533-544.
- [34] 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): 1-32.
- [35] Gopal B. A conceptual framework for environmental flows assessment based on ecosystem services and their economic valuation. *Ecosystem Services*, 2016, 21: 53-58.
- [36] Liu J G, Yang W, Li S X. Framing ecosystem services in the telecoupled anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(1): 27-36.
- [37] Felipe-Lucia M R, Martín-López B, Lavorel S, Berraquero-Díaz L, Escalera-Reyes J, Comín F A. Ecosystem services flows: why stakeholders' power relationships matter. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0132232.
- [38] Bagstad K J, Semmens D J, Diffendorfer J E, Mattsson B J, Dubovsky J, Thogmartin W E, Wiederholt R, Loomis J, Bieri J A, Sample C, Goldstein J, López-Hoffman L. Ecosystem service flows from a migratory species: spatial subsidies of the northern pintail. *Ambio*, 2019, 48(1): 61-73.
- [39] Semmens D J, Diffendorfer J E, Bagstad K J, Wiederholt R, Oberhauser K, Ries L, Semmens B X, Goldstein J, Loomis J, Thogmartin W E, Mattsson B J, López-Hoffman L. Quantifying ecosystem service flows at multiple scales across the range of a long-distance migratory species. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 255-264.
- [40] Goldenberg R, Kalantari Z, Cvetkovic V, Mörtberg U, Deal B, Destouni G. Distinction, quantification and mapping of potential and realized

- supply-demand of flow-dependent ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 599-609.
- [41] Lankia T, Kopperoinen L, Pouta E, Neuvonen M. Valuing recreational ecosystem service flow in Finland. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 2015, 10: 14-28.
- [42] Egarter V L, Depellegrin D, Pereira P, De Groot R, Tappeiner U. Mapping the ecosystem service delivery chain: capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 422-436.
- [43] 赵庆建, 温作民, 张敏新. 识别森林生态系统服务的供应与需求——基于生态系统服务流的视角. *林业经济*, 2014, 36(10): 3-7.
- [44] Balzan M V, Caruana J, Zammit A. Assessing the capacity and flow of ecosystem services in multifunctional landscapes: evidence of a rural-urban gradient in a Mediterranean small island state. *Land Use Policy*, 2018, 75: 711-725.
- [45] Verhagen W, Kukkala A S, Moilanen A, van Teeffelen A J A, Verburg P H. Use of demand for and spatial flow of ecosystem services to identify priority areas. *Conservation Biology*, 2017, 31(4): 860-871.
- [46] 周晨, 丁晓辉, 李国平, 汪海洲. 南水北调中线工程水源区生态补偿标准研究——以生态系统服务价值为视角. *资源科学*, 2015, 37(4): 792-804.
- [47] Fu Y C, Zhang J, Zhang C L, Zang W B, Guo W X, Qian Z, Liu L S, Zhao J Y, Feng J. Payments for Ecosystem Services for watershed water resource allocations. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 689-700;
- [48] Wen C. Payments for ecosystem services of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project in China [D]. Leeds: The University of Leeds, 2014.
- [49] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [50] Stürck J, Poortinga A, Verburg P H. Mapping ecosystem services: the supply and demand of flood regulation services in Europe. *Ecological Indicators*, 2014, 38: 198-211.
- [51] García-Nieto A P, García-Llorente M, Iniesta-Arandia I, Martín-López B. Mapping forest ecosystem services: from providing units to beneficiaries. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 126-138.
- [52] Ninan K N, Inoue M. Valuing forest ecosystem services: case study of a forest reserve in Japan. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 78-87.
- [53] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, Fisher B, Green R E, Lehner B, Malcolm T R, Ricketts T H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9495-9500.
- [54] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. *生态学报*, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [55] Wolff S, Schulp C J E, Verburg P H. Mapping ecosystem services demand: a review of current research and future perspectives. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 159-171.
- [56] Hou Y, Burkhard B, Müller F. Uncertainties in landscape analysis and ecosystem service assessment. *Journal of Environmental Management*, 2013, 127: S117-S131.
- [57] Daily G C, Polasky S, Goldstein J, Kareiva P M, Mooney H A, Pejchar L, Ricketts T H, Salzman J, Shallenberger R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 21-28.
- [58] 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.
- [59] Boerema A, Rebelo A J, Bodi M B, Esler K J, Meire P. Are ecosystem services adequately quantified? *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(2): 358-370.
- [60] 刘慧敏, 刘绿怡, 丁圣彦. 人类活动对生态系统服务流的影响. *生态学报*, 2017, 37(10): 3232-3242.
- [61] Wei H J, Fan W G, Wang X C, Lu N C, Dong X B, Zhao Y N, Ya X J, Zhao Y F. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: a review. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
- [62] Liu M C, Yang L, Min Q W. Establishment of an eco-compensation fund based on eco-services consumption. *Journal of Environmental Management*, 2018, 211: 306-312.
- [63] 彭建, 杨旻, 谢盼, 刘焱序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. *生态学报*, 2017, 37(13): 4562-4572.