

DOI: 10.20103/j.stxb.202408272023

吕悦风, 吴次芳. 面向运动过程的生态系统服务流空间传导机理研究. 生态学报, 2025, 45(10): 5043-5052.

Lü Y F, Wu C F. Research on the mechanism of spatial transmission of ecosystem service flows oriented to movement processes. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 5043-5052.

面向运动过程的生态系统服务流空间传导机理研究

吕悦风^{1,*}, 吴次芳²

¹ 浙江财经大学公共管理学院, 杭州 310018

² 浙江大学土地与国家发展研究院, 杭州 310058

摘要: 生态系统服务被认为能够通过多样化的流动形式在特定地理空间范围内进行空间传导, 继而在异地发挥其服务效用。然而截至目前, 学界对于生态系统服务流的理论认知尚处于起步阶段, 既有研究多套用“服务供给—服务流动—服务需求”的基础框架展开, 更关注于生态系统服务在地理空间上的静态截面变化, 欠缺对人类生态福祉享用全生命周期过程的动态认知。将流体力学的基础性理论引入经典框架, 扩展构建生态系统服务流“形成—驱动—位移”的三阶段运动过程, 通过机理识别分段解释生态系统服务流为何形成、受何驱动、如何位移的基本问题。研究梳理表明, 服务流的形成源于开放系统中的物质与环境基础支撑, 表现为异质性空间格局中因服务供需错位所呈现出的“梯度势差”; 服务流驱动的实质是运动过程中力与能量的变化, 根据呈现形式大致可以被归纳为三种驱动类型与五种驱动因素; 服务流的位移可被抽象为质点在地理三维坐标中的变化过程, 是人地耦合系统内生态系统服务格局-过程-尺度的动态呈现。面向运动过程阐明人地耦合系统内部多样化生态系统服务流动现象背后的共性规律与特性差异, 有助于丰富和拓展生态系统服务的理论体系。

关键词: 生态系统服务流; 空间传导; 运动过程; 机理研究

Research on the mechanism of spatial transmission of ecosystem service flows oriented to movement processes

LÜ Yuefeng^{1,*}, WU Cifang²

¹ School of Public Administration, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018, China

² Land Academy for National Development, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: Ecosystem services are recognized as being able to be spatially transmitted within geography in diversified flow forms, subsequently exerting their service utility in different locations. Complexity makes the concept of ecosystem service flow a frontier issue in the field of ecology and geography. However, the theoretical cognition of ecosystem service flows is still in its infancy. Most of the existing studies have been conducted using the basic framework of “service supply-service flow-service demand” proposed by SPAN conceptual model. Although abundant academic research has been made on the static cross-section changes of ecosystem services in geography, the current dynamic cognition of the whole life cycle process of human ecological well-being is still insufficient. Considering that the conduction of ecosystem service flow can be regarded as a kind of spatial motion process, which has the characteristics of motion relativity, energy conservation and structural continuity like general fluid. This study introduced the basic theory of hydrodynamics into the classical framework, and try to establish a research framework of the three-stage “formation-driving-displacement” movement of ecosystem service flow. Through this new framework, we explained the formation, driving and displacement mechanisms of ecosystem service flows

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (42401120); 浙江省自然科学基金探索项目 (Q24D010026); 教育部人文社会科学研究青年基金 (24YJCZH202)

收稿日期: 2024-08-27; **网络出版日期:** 2025-04-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyuyuefeng@zufe.edu.cn

using the modular decomposition method. The study shows that: (1) the formation of service flows originates from the support of material and environmental bases in the open system, which is manifested as the gradient potential difference in the heterogeneous spatial pattern due to the mismatch of ecosystem service supply and demand. (2) The essence of service flow drive is the change of force and energy in the process of movement, which can be broadly subdivided into three types of drive (geophysical-chemical natural processes, biome behaviour as well as human socio-economic activities) and five driving factors (natural, biological, market, policy and perceptual). (3) The spatial displacement of ecosystem service flows can be abstracted as a function of mass points in three-dimensional coordinates, which can be portrayed comprehensively through coverage and flow paths, and is affected by a combination of factors such as fluid content, environmental media, and transit carriers, and is a dynamic presentation of the ecosystem service patterns-processes-scales within the human-land coupling system. This study aimed to elucidate the common rule and spatial characteristic behind the diversified ecosystem service flow phenomenon within the human-earth coupling system, which can not only help to enrich and expand the theoretical system of ecosystem services, but also provide support for guiding the direction of high-quality and sustainable development.

Key Words: ecosystem service flow; spatial transmission; movement process; mechanistic study

生态系统服务概念用于指代人类从自然生态系统中所获取的一切福祉惠益,它被认为具有一定的流动性,能够在特定地理范围内发生传递、转移和流动,继而在异地发挥其服务效用^[1-2]。近十年来,相关学术研究开始陆续使用生态系统服务流(Ecosystem service flow, ESF)一词来描述这种生态系统服务效用跨境实现的过程^[3-5]。作为生态系统服务领域的新兴分支议题,生态系统服务流以自然环境为供应源头、以人类需求为传导目标,能呈现出由生态服务供应到人类福祉需求间全生命周期的动态关联过程,是人地交互关系的直观反映^[6]。科学认知生态系统服务流,有助于优化人地系统要素、结构与功能上的潜在矛盾,可以从理论和实践侧更准确地指导可持续发展目标实践。

事实上,随着工业化及城市化对于资源要素空间运动交互距离、范围尺度与系统结构的重塑作用,流动性在人地交互关联以及空间组织布局中的重要程度已日益凸显,并逐渐超越传统“场所空间”的决定性影响^[7]。作为践行生态文明建设,保障高质量发展空间基底的“一张蓝图”,新时期国土空间规划也将促进要素合理配置和畅通流动作为开发与保护综合格局构建工作中的重要内容^[8]。在此导向下,涉及社会经济类的流动性要素(例如人口、资本、土地、能源、基础设施、公共服务等等)的格局优化、均等交互与系统治理已然得到广泛关注。与之对应的是,现阶段关于生态类要素(生态系统服务)流动性的探讨却未能得到足够重视,且在实践中也缺少有效的经验积累。其中一个很重要的原因便在于,生态系统服务的空间流动过程受到自然地理规律与社会经济驱动的协同影响,具有其多样性、复杂性以及不确定性^[6]。当前普遍使用的“服务供给-服务流动-服务需求”的研究框架主要基于地理学视角出发^[9],在着重展现生态系统服务供需静态截面空间特征的同时,也缺乏对于服务流动过程,特别是人类生态福祉获取全生命周期过程多样化表现形式的有效解释,例如在同一组服务供需单元之间,粮食生产服务流可以通过交通工具进行定向运输,产水服务流能够在重力驱动下沿河道从上游向下游进行传递,而气体调节服务流则会随着大气流动而有序扩散。现有的知识体系尚不足以清晰归纳生态系统服务流的空间传导过程,特别是对于人地耦合系统内非地理要素的机理识别仍不明晰。

鉴于此,本文在梳理生态系统服务流空间传导概念内涵的基础上,将流体力学中的基础性理论引入经典框架,扩展构建生态系统服务流“形成-驱动-位移”三阶段运动过程的研究框架,通过分段机理识别解释生态系统服务流为何形成、受何驱动、如何位移的基本问题,由此阐明人地耦合系统内部多样化生态系统服务流动现象背后的共性规律与特性差异,以期丰富和拓展生态系统服务流的理论体系。

1 生态系统服务流空间传导的理论基础

1.1 生态系统服务流的内涵界定

生态系统服务流是指在生态系统服务静态认知基础上对于其动态转移、传递与转化过程的进一步探讨延伸^[6]。事实上,这一细分领域形成至今仅十年左右时间,且受限于生态系统服务流概念的发展性,其作为专业学术术语的使用至今仍是“不统一的^[10]”与“模棱两可的^[11]”。不同学科范式下对于这一概念的释义涵盖作用路径^[12-13]、空间转移^[14]、结果与效用^[15-16]、远距离耦合关系^[17]、区域可持续过程^[18]等多种解读,中文学者对此也有“关注过程”、“关注数量”、“关注空间”等不同方向侧重^[19-20],充分展现出对于生态系统服务流这一概念的认知丰富性。本文在梳理国内外相关释义的基础上,主要从生态及地理学范式出发,将生态系统服务流狭义界定为“一类由生态空间所提供的生态系统服务在直接或间接的驱动因素作用下,依靠或不经载体,由服务供应区沿特定方向和路径传递至服务需求区发挥效用的潜在空间传导现象^[21]”。通过这一表述用以概况表征人类跨境享用自然生态福祉惠益的实现全生命周期过程。

1.2 生态系统服务流空间传导的运动过程解构

2013年,学者 Bagstad 等基于 SPANs 模型首次提出了一个“供给-流动-需求”的概念框架(亦有生产-传递-消耗、源-汇-用等多种中文译义表达)用以捕捉生态系统服务的空间动态性质^[22],该框架在后续学者的不断拓展完善下现已成为现阶段生态系统服务流研究的主流范式。本文将尝试将流体力学中的基础性理论引入这一经典概念框架,面向运动过程将服务流动环节进一步扩展分解为“形成阶段(阶段Ⅰ)→驱动阶段(阶段Ⅱ)→位移阶段(阶段Ⅲ)”的三阶段过程(图1),具体如下:

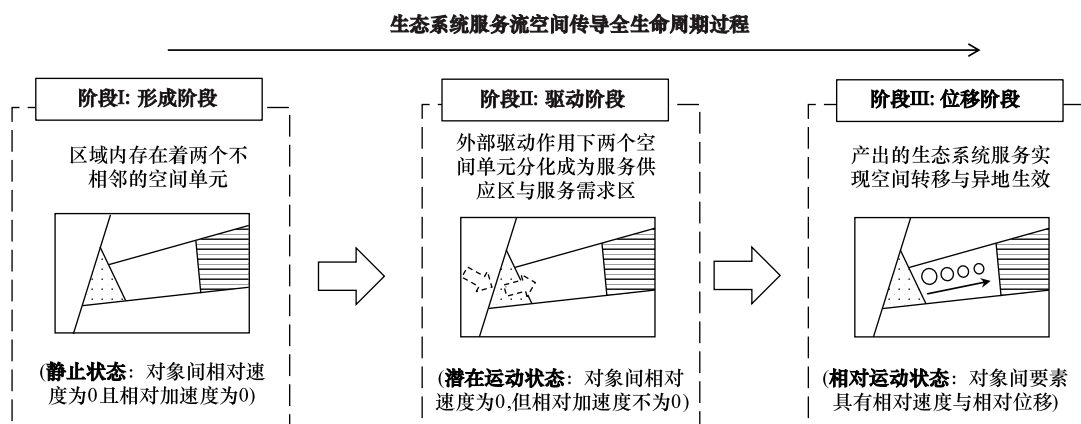


图1 生态系统服务流空间传导“形成—驱动—位移”的运动三阶段过程分解

Fig.1 The three-stage process decomposition of “formation-drive-displacement” movement of ecosystem service flow

(1)形成阶段(阶段Ⅰ)指异质性区域范围内存在两个不相邻的空间单元。此刻两个单元均处于原位静止状态,彼此间相对速度为零,相对位移为零,相对加速度也为零。

(2)驱动阶段(阶段Ⅱ)指在外部能量输入或受力驱动下,两个不相邻空间单元建立耦合关联并彼此分化成为服务供应区与服务需求区。此刻双方处于潜在运动趋势状态,彼此间相对速度为零,相对位移为零,但相对加速度不为零。

(3)位移阶段(阶段Ⅲ)指在持续能量输入或受力作用下两个单元间的受力平衡被打破,服务供应区产出的生态系统服务随即将在空间中发生位移。此刻生态系统服务所承载的物质、能量或信息与服务需求区之间处于相对运动状态,彼此间相对速度、相对位移于相对加速度均不为零。

三个阶段根据力与运动的基本规律顺次发生,且在功能上交互协作。可根据模块化原则,分段识别不同类型生态系统服务流在形成阶段(服务流发生必需的物质条件与开放环境)、驱动阶段(服务流传导的正向驱

动与逆向阻滞)以及位移阶段(服务流运动的传播范围与位移轨迹)中的共性规律及特性差异,通过拓展建构“形成-驱动-位移”运动过程中关于服务流空间传导的机理体系,有助于进一步揭示生态福祉跨境实现的内在规律,继而丰富人与自然耦合系统内的人地关系思想。

2 生态系统服务流空间传导的形成机理

生态系统服务流的形成可被视作是一种由“静止状态”到“具备潜在运动趋势状态”的过程。潜在运动趋势是一个瞬间、过渡性质的物理概念,用以表示相对静止的物体在受到外力作用(不包括静摩擦力)时将向某个方向发生相对运动的一种状态,这表明人地耦合系统内部天然存在这样的本底条件,能够使得由自然环境产出的生态系统服务在以服务受益区为参考系上进行相对运动过程(图2)。

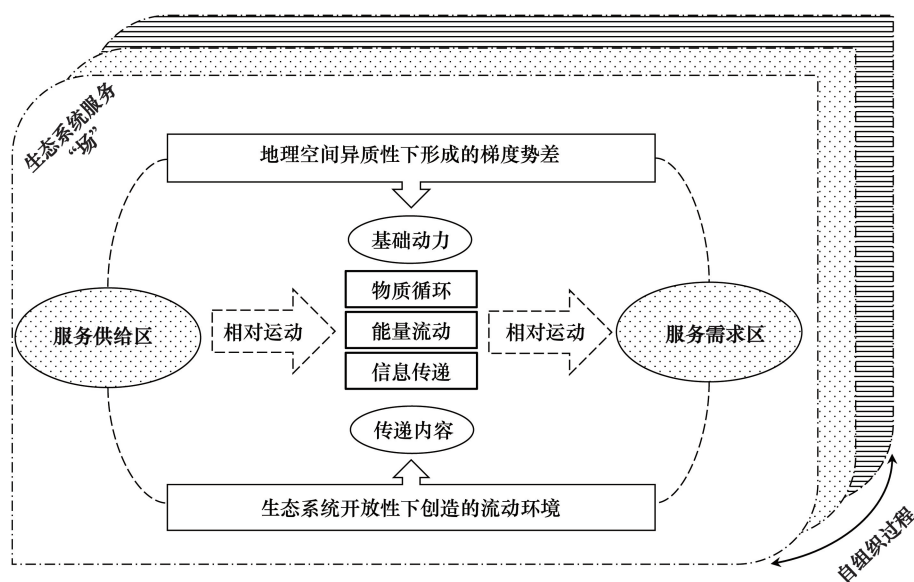


图2 生态系统服务流传导的形成机理图示

Fig.2 Diagrammatic representation of the formation mechanism of ecosystem service flow

2.1 地理空间异质性形成了生态系统服务流动的梯度势差

“场”和“势”在物理学中是一组成对出现的概念,“场”是指某个对处于其中的物质具有特定作用力的空间,而“势”在数学上指场中作用力沿梯度方向的积分,可用于表示将单位质量物质从无穷远处转移至场域中心所消耗的能量^[24]。生态系统服务的空间流动也可以通过“场”和“势”的基础概念来进行解释。从服务供给端而言,资源禀赋与地域差异天然决定了不同区域具有复杂、多样、且异质的景观类型,将会深度影响生物种群维系、群落形成以及部分生态过程的作用进程,从而改变物质、能量及信息在景观中的形成与传播活动^[25-26]。此外,随着全球人类活动强度的不断增大,不同区域通过以土地利用/覆被变化为代表的人地活动方式不断改变和影响生态系统服务及功能间的连接网络^[27],并由此进一步加剧服务供给的不均质性^[28]。与之相对应,从服务需求端来说,生态系统服务概念自带强烈的人类中心主义色彩,致使不同社会发展、文化背景、思想意识与教育水平个体对于同一生态系统服务的感知与利用水平大不相同,这同样将反映为生态服务需求的异质性空间格局。正是由于生态系统服务供需在空间上的不均质分布,致使每个空间区域在各“生态系统服务场”中所具有的“势”各不相同,由此产生了相隔区域间的生态系统服务“梯度势差”并进一步分化形成了具有高势能的服务供给区以及具有低势能的服务需求区,从而为两个区域间生态系统服务的势能转换与传导运动提供了基础动力。

2.2 生态系统开放性创造了生态系统服务流动的基础环境

由系统论可知,系统在状态上可分为开放系统、封闭系统与孤立系统三种类型,其中,开放系统用于指代

系统与外部环境存在着密切的物质、能量与信息交互活动,本系统将会受到外部环境的较大影响^[29]。生态系统服务产自环境中的各类生态系统,而生态系统可被定义为指代在特定时空范围内,由生物种群群落与自然环境构成的统一整体。大到海洋、大陆、生物圈,小至一片森林、一块草地都属于生态系统的范畴。作为构成生态学意义上的结构、功能与进化的基本单位,生态系统是一个持续与外界环境进行物质与能量交互活动的开放系统^[30]。在一个完整的生态系统内部,以氧气、水分、微量元素等为代表的维持生命活动的各类物质都会首先为系统内的生产者所利用,然后通过植物光合作用中的有机物合成过程实现营养级之间的物质传递,最后经生态系统中的分解者处理后再次被重新释放到环境,如此反复循环;与此同时,维持自然生态系统的能量则基本全部来源于太阳能,由绿色植物接收后沿食物链传递至各级消费者与分解者,并最终通过各种形式的热量进行消耗和散失。生态系统服务在这样的基础环境下也具备天然的流动性,可以伴随着生态功能表达过程中的物质循环、能量流动与信息传递而发生空间流动。

2.3 开放系统自组织提供了生态系统服务流动的佐证依据

在开放系统与外部环境的持续交互过程中,系统内部物质、能量以及信息的量度均会不断增加,并将自发推动开放系统的结构与功能逐步由低层次系统向高层次系统迁移演化。20 世纪以来,相关学科与理论逐渐开始使用“自组织”这一概念来描述开放系统内部由简单走向复杂、无序走向有序、低级走向高级的自发过程^[31]。对于生态系统而言同样也是如此,自然条件下一个完整的生态系统包含生产者、消费者、分解者、流通者与调控者五类功能群结构,系统内部功能可以独立支持“初级生产→高级生产→流通→分解→再利用”的作用全过程,并推动系统内部物质、能量与信息的畅通流动。然而,在外部环境的干扰作用下,特别是全球工业革命以来人类对于自然环境与生态系统的影响程度不断加剧,致使越来越多完整的生态系统在结构与功能上发生残破。残破生态系统的单元结构将会由完整化向单一化转变发展,在降低自身多功能性、抗干扰性与调节韧性的同时,会在一定程度强化其特定功能的表达(比较典型的案例包括人类耕作管理活动影响下的农田系统调节服务与抗干扰能力有所下降,但特定的粮食生产服务能力大幅上升)。此类残破生态系统无法独立行使其完整的功能,可被视作是自然规律下生态系统自组织演化进程中的一种短时期的涨落过程,最终会在更长时间与更广空间尺度下其他残破生态系统间建立一定的分工与合作关系(例如人类通过贸易和运输将城郊农田生态系统产出的粮食转移至城市供市民消耗利用),并重新形成以生态系统服务流动传导相联结的稳定的功能耦合系统。这充分表明,开放性既是生态系统稳定存在与演化发展的必要前提,也为生态系统服务流的形成提供了佐证依据。

3 生态系统服务流空间传导的驱动机理

生态系统服务流传导的驱动过程可被视作是一个由“潜在运动趋势状态”到“持续稳定运动状态”的转化过程,而运动状态的改变必然可归因于力与能量的变化情况。根据能量守恒定律,能量既不会凭空产生,也不会凭空消失,只会从一种形式转化为另一种形式,或者从一个物体转移到其他物体而保持总能量不变,生态系统服务流发生持续稳定运动过程所额外消耗的能量必然可追溯至外部能量的直接输入或内外部驱动合力运动做功转化所得。有鉴于此,可通过分类梳理用以揭示生态系统服务流驱动的内在机理。

3.1 太阳辐射是生态系统服务流传导的基础动力来源

现代科学研究成果表明,太阳辐射所产生的能量是地球表面一切有生命机体进行生物化学活动以及它们与生态环境间互动过程的最基本能量源泉^[32]。一方面,太阳作为一个近似于持续核聚变反应堆的炽热气态球体,通过能量的连续放射、吸收与再辐射向地球传输巨量能量,据统计估算,地球从太阳获取的能量约为 $2.095 \times 10^{17} \text{ J/min}$,庞大的外部能量输入为地球上的分子热运动活动提供基础条件,成为地球生物圈中各类物理化学作用活动的根本动力来源^[32]。另一方面,太阳能目前被证实是天然形成有机物的唯一能量来源,它通过绿色植物的光合作用以有机物的形式沿复杂的食物链与食物网进行物质循环与能量流动,并最终供应与满足生物圈内一切生命机体生物活动所需必须的物质及能量。

3.2 生态系统服务流驱动的差异化模式

由上可知,太阳辐射被视作是一切生态活动与生态过程的基础动力来源,也被称为一级生态动力源。牛翠娟等通过总结概况形成了气候、水文、土壤、地貌、生物与人类共六类生态因子,认为这些因子既可以作为生态动力源收集来自一级动力源(太阳辐射)提供的能量,同时自身也能以生态动力源的形式向其他要素供应能量,可被视作是基础动力源之下的二级生态动力源^[33]。本文在继承这一观点的基础上,认为太阳辐射可以通过二级生态动力源的中介作用,以地球物理化学自然过程(包括气候、水文、土壤与地貌四大因子)、生物群落行为以及人类社会活动共三类差异化形式驱动生态系统服务流发生传导运动。

3.2.1 地球物理化学自然过程

包括大气环流、日照偏移、水分蒸发、潮汐涨落、岩石风化、地壳运动等现象在内,自然界能够通过各类地球物理化学自然过程将太阳辐射所获取的能量转化为气候、水文、土壤或地貌因子的变化形式,这些二级生态动力源能够借助相应的生态作用过程进一步为细分因素提供外部驱动。以最为典型的大气/水循环过程为例,受限于地球球状形态及下垫面物理性质的空间差异,地球表面获取的太阳辐射水平处于极度不平衡状态,将会影响地表大气密度、气压、温度等系列自然理化性质,继而使得大气中产生各种尺度的水平运动与垂直运动,地球表面的水体在地表太阳辐射能量异质性获取的前提下,发生蒸发、传递、凝结、降水、径流等一系列物理化学活动,并最终在全球范围尺度下形成水的循环往复过程^[34]。除此之外,大气/水循环活动又可以为区域间的物质迁移与能量交换活动提供重要的外部驱动。以水(涵养水源、径流调节)、气(固碳制氧、气候调节)、土(土壤形成、水土保持)等为代表的的一系列供给、支撑与调节服务在空间传导过程中都将时刻受到地球物理化学自然过程的驱动影响。

3.2.2 生物群落行为

自然环境中的生物因子同样也会通过群落自身的生物学行为驱动相关服务流进行空间传导。一方面,一些生物群落本身就属于为人类所享有的福祉范畴,例如北太平洋的鲑鱼洄游活动造就了阿拉斯加捕鱼产业的兴旺发达,21 世纪之初阿拉斯加的鲑鱼年捕捞量就高达 1.7 亿条,其产生的经济效益约合 2.6 亿美元^[35]。另一方面,一些生物群落在其自身生物活动过程中也为人类社会辅助提供跨区域的生态系统服务,例如栖息于墨西哥边境地带的长鼻蝙蝠和猪鼻蝙蝠会在夏季迁移飞往美国,从而为美国德克萨斯州的农业提供大量“免费”的害虫防治服务;蜂鸟与帝王蝶可以在跨越大洋的迁徙过程中进行花粉传递活动,有助于实现跨地带景观植被的花粉与基因流动^[36];东南亚麝香猫的生物活动能够提升当地咖啡产业的口碑与产值,如此等等。相较于自然型驱动以太阳辐射和地球重力作用下的地球物理化学自然过程,生物因子主要借助群落载体的地域性活动和生物学行为(例如捕食、寄生、竞争、迁徙、共生等等)以辅助实现生态系统服务的空间转移和异地生效。

3.2.3 人类社会活动

尽管从理论上而言,人类也隶属于生物因子中一个组成部分,然而考虑生态系统服务的人类中心主义属性,人类在生态系统服务流传导过程中参与表现出了更为丰富多样的生物学活动与行为。故将这一部分单独拆解,根据人类的自然生理活动与社会经济活动差异,又可将具体的驱动因素细分为以下三类:

(1) 市场型驱动因素

一些供给服务所产出的生态产品可以为人类社会生产和发展提供基础性的资源支持,例如谷物、淡水、肉类、木材、矿藏、能源、纤维等等,此类生态系统服务可以被完全市场化后,通过要素收益的区域差异在市场作用下实现其在地理空间上的自由流动过程。自工业革命以来,伴随着人类社会生产能力、交通运输能力和信息通讯能力的不断发展,市场贸易的自由化程度不断升高,并带动生态系统服务(产品)生产、流动、消费活动的持续交互与不断扩展。据世界贸易组织的统计数据显示,全球货物贸易出口额由 1990 年的 3.49 亿美元飞速增长至 2023 年的 23.8 万亿美元;参考联合国粮农组织(FAO)的相关数据,稻米、小麦、玉米、大豆等谷物的出口比例分别由 1960 年的 2.9%、17.8%、6.3% 和 10.0% 增长至 2012 年的 5.4%、24.5%、13.7% 和 21.4%。再考

考虑到国家内部、区域内部、城乡之间更为庞大的跨区域贸易活动,可见市场型驱动极大程度地推动了生态系统服务与生态产品在愈发频繁的交易过程中进行互通流动。

(2) 政策型驱动因素

除市场对于生态系统服务的配置作用外,政策制度设计同样也是“市场失灵”情景下配置生态系统服务流的重要外部驱动因素。政府作为市场的有益补充能够在以下三方面影响生态系统服务流的传导过程。其一,政府能够作为市场工具的互补提供一些市场难以有效提供的生态系统服务。例如以水质净化、气体调节等为代表的基础性生态系统服务通常被认为具有非竞争性和非排他性,市场很难通过排他的方式从这些生态系统服务的传递中获取收益,因此这些服务往往会由国有企业(例如大坝、水库、水厂等)或地方政府(例如各级政府空气污染治理专项、“绿水青山保卫战”等)展开全过程治理。其二,政府可以通过禁止负外部性行为(例如城市建成区内部的污染企业关停、搬迁)或者激励正外部性行为(河道下游对于上游的生态补偿、生态付费措施)来间接强化原有的生态系统服务流。其三,政府可以通过完善、保障产权制度来激发市场配置生态系统服务的能力。例如可以通过规范、确立和完善的“碳排放权”、“排污权”、“用水权”等生态产品的产权和使用权,继而激发相应一、二级市场的交易潜力,最终协同市场手段来促进生态服务与生态产品的隐性转移^[37]。

(3) 感知型驱动因素

自然生态环境除了直接或间接为人类享受的产品和功能外,还为人类提供丰富多样的非物质收益,具体包括文化多元、精神宗教、知识系统、教育价值、灵感、美学价值、社会关系、地方感、文化遗产价值、游憩和生态旅游十个小分类,MA 框架中通过“文化服务”来概括这类非物质收益。与传统意义上以物质循环或能量流动为主要流体内容的生态系统服务流不同,这类服务主要包含人类从自然生态系统中获得的主观体验和对身体、情感、精神等方面的认知,所传导的流体内容涵盖各种物理信息(如光、声、温度、湿度、磁力等)、化学信息(如生物体的产物或分泌物等)、行为信息(如生物体的行为动作等)。这类生态系统服务流的传导具有主观性,其驱动水平和程度很大程度取决于人类个体的感知偏好水平,既受到服务受益者的视觉、听觉、嗅觉、触觉、味觉等生物感知能力影响,又与不同受体之间的教育背景、宗教信仰、生活方式、社会习俗等与自身经历的差异密切相关,还取决于不同受体之间的教育背景、宗教信仰、生活方式、社会习俗等因素^[19]。

4 生态系统服务流空间传导的位移机理

生态系统服务流空间传导的最终结果反映为生态产品、功能及服务空间转移与异地生效。然而,不同类型生态系统服务流却具有差异化的运动过程与表现形式。面向运动过程出发,本文结合模块化思想将服务流传导类比为复杂系统内部的运行过程,其传导的全生命周期过程可被视作是由若干具备独立结构或功能的子系统模块共同组成,过程中每个子系统的属性特征都会影响和决定服务流最终呈现的形式与内容。通过对每个子系统模块中可能存在的形式、类型与属性进行系统罗列,从而阐明服务流传导过程中的位移机理和空间规律。

4.1 生态系统服务流空间传导的模块化分析

模块化方法最早源于计算机程序设计,是指将待开发的软件程序拆解为若干小而简单的部分后进行分项功能设计,后被逐渐迁移至工业制造与企业管理等相关领域,意指将一个复杂系统、过程或问题按照一定的联系规则拆解为多个独立的、相互关联的模块,再通过分别独立地实现各模块的功能,最终将所有模块组合起来以处理大型、复杂问题的一种途径。考虑到生态系统服务流动的复杂、多样性,本文尝试通过模块化思想将其分解为若干基本环节并进行模式化,从而清晰展现生态系统服务流空间位移过程中的机理特征。

结合本文提出的生态系统服务流空间传导“形成—驱动—位移”的三阶段过程,可知服务流传导过程中必然存在着支持相应运动过程表达的功能模块(图3)。其中,形成模块的主要功能在于为服务流的传导过程构建基础的开放性环境并提供相应的流体内容;驱动模块在吸收与转换外源能量输入的基础上,为其他功能模块运行提供能量支持,并能够通过能量转换和机械做功的形式将服务流承载的效用(物质、能量或信息)传导至受益用户处以供消耗享用。位移模块则用以支持流体内容具有相对运动速度后的空间位移过程,在受到

形成模块以及驱动模块的协同作用下,流体内容将会持续改变运动速度与运动方向,并在地理空间上留下其运动轨迹。耦合开放系统中的形成模块、驱动模块与位移模块通过交互协作,共同推动生态系统服务流实现全生命周期的传导过程。三类功能模块在功能上相互分工,在组成要素、结构与形式上则相互重叠共享,存在一些代表性的要素或特征贯穿其中,能够支撑和影响生态系统服务流的空间传导与有序运动。通过对于这些要素与特征进行梳理归纳,有助于厘清生态系统服务流动的位移机理。

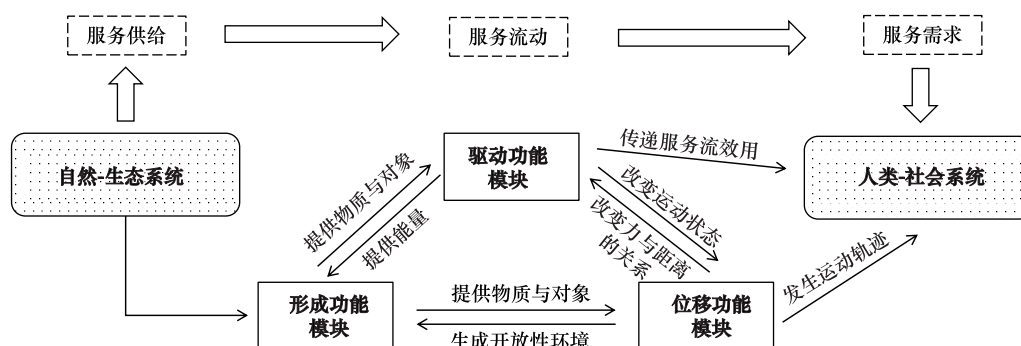


图3 生态系统服务流空间传导的功能模块表达

Fig.3 Expression of functional modules for the spatial conduction of ecosystem service flows

4.2 生态系统服务流位移的表现形式

当服务流体在外部驱动作用下产生相对加速度后,它就会被赋予速度并在空间上进行相对位移过程。尽管不同类型服务流流体内容的形状并不全部规则可见,参考流体力学领域中的“连续介质假设”,一切真实流体所占有的空间可以被近似地看作连续地无空隙地充满着“质点”。“质点”被定义为在微观上充分大、宏观上充分小的分子团,它所具有的宏观物理量在理论上满足一切应遵循的物理定律^[38]。生态系统服务流作为人地耦合系统内部综合作用的结果,同样具备理想流体运动中的连续性特征,因而也可以被抽象为一类质点的空间运动过程。通过拉格朗日法可以将任意服务流空间传导的位移过程转化为关于质心起点坐标(x, y, z)与时间 t 的数学函数,这有助于辅助理解多样化生态系统服务流差异化的位移表现形式。

数学函数中使用定义域和对应法则来表征函数的几何图像,其中定义域表示自变量可以取值的范围集合,对应法则指代自变量映射至应变量的关系集合。如前文所述,生态系统服务流空间传导的位移过程同样能够被抽象为数学函数,因而其也具备这样的表征形式。定义域即可对应生态系统服务流空间传导的覆盖范围。联合国千年生态系统评估报告中就曾明确指出“生态系统过程与服务的出现与特征尺度紧密相关^[39]”。不同类型生态系统服务流的空间覆盖范围在几米至几万千米不等^[40],以群落生物循环为主的低等级自然综合体,其服务覆盖范围在局地尺度(100 km 以内);以地区性大气环流和大流域物质迁徙为代表的中等自然综合体,其服务范围可覆盖区域尺度(10^2 — 10^4 km);而对于全球性大气循环、地质循环以及商贸活动等内部综合联系的高等级自然综合体,其服务范围可以覆盖全球尺度(超过 10^4 km)^[41—42]。除此之外,生态系统服务流空间传导过程中的对应法则可通过流动路径予以呈现。根据相关学者的研究成果,服务流多样化的位移形式按其流动方向与路径大致可被划分为原位临近型、固定路径型、全方向型、使用者移动型等多种形式^[43]。通过覆盖范围(定义域)与流动路径(对应法则)能够直观反映不同类型服务流空间传导的位移轨迹,是对于人地耦合系统内生态系统服务流格局—过程—尺度的综合呈现。

4.3 生态系统服务流位移的影响因素

生态系统服务流在地理空间上的运动与位移过程受到复合影响因素的综合作用^[44]。一方面,服务流动与形成模块中的基础物质与对象紧密相关。服务流按照承载流体内容的形式大致可被划分为物质流、能量流、信息流等多种类型,不同类型服务流在传导形态与空间轨迹方面都存在较大差异^[6]。除此之外,服务流空间位移同时也受到环境介质与转运载体的共同影响。环境介质与转运载体作为服务流传导的物理媒介,充

斥于服务连接区之中,为服务流动提供开放性的基础环境,包括以大气环流和风场为依托的大气介质/载体;以水文活动与流域为依托的水介质/载体;以其他自然资源为依托的资源介质/载体;以人类行为与活动为依托的社会活动介质/载体等^[45]。一些环境介质与载体能够对于服务流的空间位移起到规制作用,例如河道天然决定了产水服务流的方向与路径。另一方面,服务流动中的驱动模块同样可以通过能量的转换改变力与距离间作用关系,从而影响服务流动的空间位移。通常认为服务流的空间传导过程将会经过服务连接区传导路径上的一系列中间节点(汇区),这些中间节点(汇区)可以在不同类型外部影响的综合作用下,对于服务流动产生转向(例如河道上游产水经水利设施后改道)、衰减(气体调节服务经过空气杂质后逐渐减弱)、屏蔽(粮食转运车辆经过交通卡口后遭拦截)等多种影响。不仅如此,在人地耦合系统内生态系统服务流通常以复杂网络的形式进行空间传导,实际位移过程不仅取决于生态系统的自身属性特征,也与中间节点的数量、位置、脆弱性,外部影响的强度、持续性、关联性等因素紧密相关,受到网络连接方式、模块化程度、中心度以及冗余度等的综合影响^[46]。

5 结论与讨论

(1)生态系统服务流的形成源自于地理空间异质性下的生态系统服务供需错位现象。两个不相邻区域间天然存在生态系统服务供需的梯度势差,相关服务从高势差区域跃迁至低势差区域会额外释放相应的服务势能,可以在开放性系统条件下助力形成耦合关联,并通过持续的自组织演化过程向更高层级系统迁移进化。

(2)生态系统服务流的驱动过程实质是一种外界能量输入下的运动状态改变过程(由潜在运动到发生持续稳定相对运动),可被细分为地球物理化学自然过程、生物群落行为、人类社会经济活动三种驱动形式下的自然型、生物型、市场型、政策型、感知型共五种驱动因素。它们共同作用推动生态产品、功能以及服务发生空间传导与异地生效。

(3)生态系统服务流的空间位移可被抽象为质点在三维坐标中的函数形式,可通过覆盖范围与流动路径进行综合刻画,并且受到流体内容、环境介质、转运载体等因素的综合影响,是人地耦合系统内生态系统服务格局-过程-尺度的动态呈现。

正如生态系统服务领域的开拓者 Costanza 所言,生态系统作为一个复杂、动态且自适应的“混乱世界”,具备模糊的边界、复杂的动态非线性反馈过程以及目的与手段间的不确定性,对于其的界定不应被不切实际的秩序性和一致性所限定,而需要根据差异化的目的、特征或视角展开,从而不断丰富人类对于这一领域的科学认知^[47]。本研究提出的面向运动过程的生态系统服务流研究框架与机理识别能够直观清晰地反映服务流空间传导过程中的属性特征,可以为跨区域生态补偿案例、生态修复工程、生态产品价值实现等自然资源实践场景目标管理或现实需求方面的参考依据。随着新时期国土空间治理体系现代化建设的持续推进,空间治理未来将更多地朝着高效、准确、全程、动态的方向发展,科学理解生态系统服务流跨境转移中的全生命周期过程也将有潜力为进一步赋能自然资源可持续管理提供理论支撑。

参考文献(References):

- [1] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521-535.
- [2] Lyu Y F, Wu C F. Managing the supply-demand mismatches and potential flows of ecosystem services from the perspective of regional integration: a case study of Hangzhou, China. *Science of the Total Environment*, 2023, 902: 165918.
- [3] 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.
- [4] 李双成,王珏,朱文博,张津,刘娅,高阳,王阳,李琰. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. *地理学报*. 2014, 69(11): 1169-1628.
- [5] 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.
- [6] 吕悦风. 城乡生态系统服务流的传导机理与量化模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [7] 席广亮,甄峰,钱欣彤. 流动性视角下的国土空间安全及规划应对策略. *自然资源学报*, 2022, 37(8): 1935-1945.
- [8] 金晓斌,叶超,岳文泽,马利邦,罗震东,杨忍,吕晓,王成,李传武,张国俊,范业婷. 新时代中国城乡融合发展:挑战与路径. *自然资源学报*. 2024, 39(01): 1-28.

- [9] 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.
- [10] Schirpke U, Tappeiner U, Tasser E. A transnational perspective of global and regional ecosystem service flows from and to mountain regions. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 6678.
- [11] Wang Z Z, Zhang L W, Li X P, Li Y J, Frans V F, Yan J P. A network perspective for mapping freshwater service flows at the watershed scale. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101129.
- [12] Ala-Hulkko T, Kotavaara O, Alahuhta J, Hjort J. Mapping supply and demand of a provisioning ecosystem service across Europe. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 520-529.
- [13] 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.
- [14] Schröter M, Koellner T, Alkemada R, Arnhold S, Bagstad K J, Erb K H, Frank K, Kastner T, Kissinger M, Liu J G, López-Hoffman L, Maes J, Marques A, Martín-López B, Meyer C, Schulp C J E, Thober J, Wolff S, Bonn A. Interregional flows of ecosystem services: concepts, typology and four cases. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 231-241.
- [15] 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.
- [16] Schirpke U, Candiago S, Egarter Vigl L, Jäger H, Labadini A, Marsoner T, Meisch C, Tasser E, Tappeiner U. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 928-941.
- [17] Friis C, Nielsen J Ø, Otero I, Haberl H, Niewöhner J, Hostert P. From teleconnection to telecoupling: taking stock of an emerging framework in land system science. *Journal of Land Use Science*, 2016, 11(2): 131-153.
- [18] Kissinger M, Rees W E. An interregional ecological approach for modelling sustainability in a globalizing world—Reviewing existing approaches and emerging directions. *Ecological Modelling*, 2010, 221(21): 2615-2623.
- [19] Kumar M, Kumar P. Valuation of the ecosystem services: a psycho-cultural perspective. *Ecological Economics*, 2008, 64(4): 808-819.
- [20] 夏沛,彭建,徐子涵,顾恬玮,王佳斌. 生态系统服务流概念内涵与量化方法. 地理学报. 2024, 79(3): 584-599.
- [21] 李双成. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社, 2014.
- [22] 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.
- [23] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [24] 吕鹏,李蒙迪. 从“草根”到“网红”: 势差理论视角下社会流动现象审视. 中国地质大学学报(社会科学版). 2022, 22(3): 137-146.
- [25] Chiron F, Chargé R, Juliard R, Jiguet F, Muratet A. Pesticide doses, landscape structure and their relative effects on farmland birds. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 185: 153-160.
- [26] Turner M G, Donato D C, Romme W H. Consequences of spatial heterogeneity for ecosystem services in changing forest landscapes: priorities for future research. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 1081-1097.
- [27] Felipe-Lucia M R, Soliveres S, Penone C, Fischer M, Ammer C, Boch S, Boeddinghaus R S, Bonkowski M, Buscot F, Fiore-Donno A M, Frank K, Goldmann K, Gossner M M, Hölzel N, Jochum M, Kandeler E, Klaus V H, Kleinebecker T, Leimer S, Manning P, Oelmann Y, Saiz H, Schall P, Schlöter M, Schöning I, Schrumpf M, Solly E F, Stempfhuber B, Weisser W W, Wilcke W, Wubet T, Allan E. Land-use intensity alters networks between biodiversity, ecosystem functions, and services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(45): 28140-28149.
- [28] Camacho-Valdez V, Ruiz-Luna A, Ghermandi A, Berlanga-Robles C A, Nunes P A L D. Effects of land use changes on the ecosystem service values of coastal wetlands. *Environmental Management*, 2014, 54(4): 852-864.
- [29] 徐晓勇. 开放经济条件下中国生态服务的空间流动及其影响研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [30] 常杰, 葛滢. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [31] 邬建国. 耗散结构、等级系统理论与生态系统. 应用生态学报. 1991, 2: 181-186.
- [32] 裴铁璠, 于系民, 金昌杰. 生态动力学. 北京: 科学出版社, 2001.
- [33] 牛翠娟, 姜安如, 孙儒泳, 李庆芬. 基础生态学. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [34] 张安录. 城乡相互作用的动力学机制与城乡生态经济要素流转. 城市发展研究. 2000, 6: 51-56.
- [35] Semmens D J, Diffendorfer J E, López-Hoffman L, Shapiro C D. Accounting for the ecosystem services of migratory species: Quantifying migration support and spatial subsidies. *Ecological Economics*, 2011, 70(12): 2236-2242.
- [36] López-Hoffman L, Varady R G, Flessa K W, Balvanera P. Ecosystem services across borders: a framework for transboundary conservation policy. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2010, 8(2): 84-91.
- [37] 王会, 李强, 温亚利. 生态产品价值实现机制的逻辑与模式: 基于排他性的理论分析. 中国土地科学. 2022, 36(4): 79-85.
- [38] 龙天渝, 蔡增基. 流体力学. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [39] Millennium E A. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.
- [40] Cortinovis C, Geneletti D. A framework to explore the effects of urban planning decisions on regulating ecosystem services in cities. *Ecosystem Services*, 2019, 38: 100946.
- [41] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. 自然资源学报. 2020, 35(5): 1172-1189.
- [42] Balmford A, Fisher B, Green R E, Naidoo R, Strassburg B, Kerry Turner R, Rodrigues A S L. Bringing ecosystem services into the real world: an operational framework for assessing the economic consequences of losing wild nature. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 48(2): 161-175.
- [43] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [44] 刘慧敏, 刘绿怡, 丁彦彦. 人类活动对生态系统服务流的影响. 生态学报. 2017, 37(10): 3232-3242.
- [45] 高吉喜. 区域生态学基本理论探索. 中国环境科学. 2013, 33(7): 1252-1262.
- [46] Dee L E, Allesina S, Bonn A, Eklöf A, Gaines S D, Hines J, Jacob U, McDonald-Madden E, Possingham H, Schröter M, Thompson R M. Operationalizing network theory for ecosystem service assessments. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(2): 118-130.
- [47] Costanza R. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350-352.