

生态系统服务流概念内涵与量化方法

夏沛¹, 彭建¹, 徐子涵², 顾恬玮³, 王佳斌⁴

(1. 北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 3. 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 广州 510060; 4. 北京大学深圳研究生院 城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055)

摘要: 生态系统服务流指示实际被使用的服务, 是连接生态系统服务供给与需求的纽带。理解生态系统服务流的概念内涵, 厘清其量化方法是推动生态系统服务流有效实践应用的基本前提。近年来生态系统服务流概念愈发受到重视, 但仍然缺乏连接概念内涵、量化方法和实践应用的系统性梳理。因此, 为强化生态系统服务供需评估的实践性意义, 本文基于过程、数量和空间3种视角梳理生态系统服务流的概念内涵, 据此明晰生态系统服务流的量化方法, 探讨生态系统服务流系统研究框架。研究认为, 应该建立“生态系统服务供需评估—生态系统服务管理行动—人类福祉提升愿景”系统性研究框架, 聚焦生态学意义与地理空间过程、利益相关者角色和面向人类福祉提升的可持续决策系统, 将生态系统服务流研究推向更广阔的发展前景与实践空间。

关键词: 生态系统服务流; 供需评估; 利益相关者; 人类福祉; 生态系统服务管理

DOI: 10.11821/dlxb202403003

1 引言

生态系统服务 (Ecosystem Services, ES) 指人类从生态系统中直接或间接获得的惠益, 是连接社会系统和生态系统的重要桥梁^[1-3]。由于生态系统服务在连接人与自然、考虑利益相关者群体与量化指标多样且简便等方面的优势, 人们不断将这一概念纳入到土壤^[4]、生物多样性^[5-6]、农业与粮食安全^[7]、全球气候变化^[8]、城市生态系统健康^[9]和城市绿化^[10-11]等议题的理论研究和管理应用中。1997年 Costanza 等首次对生态系统服务价值进行全球定量评估, 引发了国际学术界对于生态系统服务价值的广泛讨论^[1, 12]。然而, 对于生态系统服务价值量化准确性、环境伦理问题和功利性的质疑长期存在^[13-15], 尤其在解决多个生态系统服务间关系等实际问题时存在局限。2006年 Rodríguez 等^[16]指出, 当一种生态系统服务的供给由于另一种生态系统服务的增加而减少时, 或者当一个利益相关者以牺牲其他利益相关者为代价而获取更多特定服务时, 就会发生权衡。权衡将生态系统服务的内涵与行为决策结合在一起, 更有助于面向可持续目标制定最优决策^[17]。然而, 生态系统服务价值与权衡的研究并未解决生态系统服务供给与受益之间的空间错配问题^[18]。

生态系统服务流概念立足地理学视角, 聚焦生态系统服务在空间上的动态流动过程, 逐渐被应用在解决生态系统服务供需和空间错配的问题中, 试图回答人们到底使用

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2024-01-17

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2021BEG03019) [Foundation: Key Research and Development Program of Ningxia, No.2021BEG03019]

作者简介: 夏沛(1996-), 男, 江西信丰人, 博士生, 研究方向为生态系统服务。E-mail: xiapei@stu.pku.edu.cn

通讯作者: 彭建(1976-), 男, 四川彭州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为景观生态与土地利用、区域生态持续性评估、综合自然地理学。E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

了多少生态系统服务以支撑可持续管理和决策, 生态系统服务流也由此成为近年来较为热门的研究方向。例如, Bagstad等^[18-19]明确了服务流过程中源、汇、流和使用等几个关键概念, 并使用服务路径归因网络 (Service Path Attribution Network, SPAN) 绘制生态系统服务流, 这也是最早明确生态系统服务流概念和量化方法的研究之一。Egarter Vigl等^[20]通过考虑生态系统服务容量、流量和需求构建了审美体验服务的交付链, 并通过刻画游客流动路线实现了服务流动方向的空间显示。Schirpke等^[21]通过明确区分并量化生态系统服务供给、需求和流, 识别3个要素之间的依赖关系差异, 以此为基础分析不同生态系统服务的权衡协同关系。总体来看, 生态系统服务流的研究更强调人类从生态系统中实际获得的惠益^[22], 从而更好地关注生态系统服务在从源地到使用者过程中的亏空、盈余、流动方向和损耗。

目前, 已有不少学者针对生态系统服务流的概念、量化方法和研究展望等内容总结了生态系统服务流的国内外研究进展。例如, 肖玉等^[23]从供需关系出发, 梳理了生态系统服务供需关系对生态系统服务流研究的奠基与促进作用; 姚婧等^[24]重点围绕生态系统服务流的研究方法对已有研究进行了总结; Wang等^[25]通过系统性综述总结了生态系统服务流的概念、方法和应用。然而, 现有综述研究从概念内涵到量化方法再到应用实践的连接存在不足, 难以更好地应用生态系统服务流解决实际问题^[26]。具体而言, 从概念内涵到量化方法连接的不足在于, 目前对生态系统服务流的量化过程中, 不少研究并未区分实际需求、潜在供给和实际使用 (即流) 的概念, 而是聚焦服务在空间上的流动路径; 从量化方法到实践应用的连接不足在于, 部分研究使用的量化方法对生态系统服务的供需考虑不充分, 且忽略了地形等自然因素和行政管理权力等人为因素, 导致量化结果难以直接应用于生态系统服务管理。

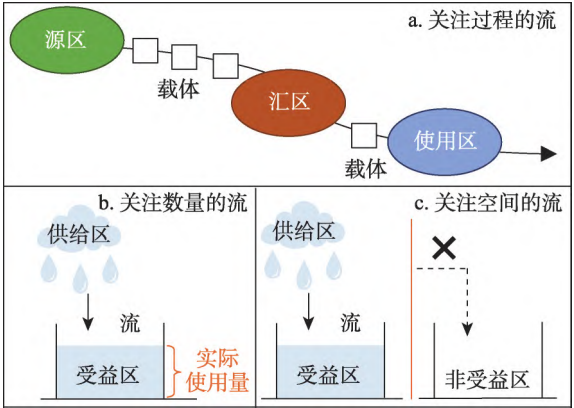
因此, 本文重点梳理了生态系统服务流概念内涵和量化方式, 构建生态系统服务流的研究框架, 并总结生态系统服务流在生态学内涵、利益相关者意见和决策应用等方面的研究不足, 对未来研究方向进行展望, 以期更好地应用于生态系统服务可持续管理。

2 生态系统服务流概念内涵

2.1 概念内涵

生态系统服务流概念与研究的形成基础是生态系统服务供需。一般认为, 流是连接生态系统服务供给与需求的纽带^[27]。尽管不同学者对于生态系统服务流内涵的表现形式理解存在差异, 但对其概念本质有基本共识, 即“实际被使用的服务”^[18]。根据关注的侧重点不同, 具体可以分为以下3类 (图1)。

(1) 关注过程, 即侧重生态系统服务从供给侧到需求侧的流动过程。这一定义强调了流从源产生、经过汇消耗、再到使用者被消费的完整过程。例如, Bagstad等^[18]建立了一个生态系统服务流量化框架, 认为生态系统服务由特定的载体运输, 源区、汇区和使用区分别是提供载体、耗尽载体和使用者所在的位置。同时根据载体的性质, 可以进一步将生态系统服务流分为供给性的流和预防性的流。这一框架充分考虑了生态系统服务与其受益者之间的空间错配, 并首次较为明确地定义了生态系统服务流过程中各要素的概念, 具有相当的影响力^[28]。但在目前的实践案例研究中, 基于载体强调汇的过程, 同时将生态系统服务流分为供应和预防两种性质的分类方式应用较少。并且, 由于对服务流的中介因素考虑不够充分, 对供需之间关系理解不足, 少有研究能够完整还原生态系统服务的流动过程。



注：图 a 改编自 Bagstad 等^[18]，生态系统服务通过载体经过“汇”的损耗到达使用区；图 b 改编自 Villamagna 等^[22]，聚焦受益区实际使用的生态系统服务数量；图 c 改编自 Serna-Chavez 等^[32]，强调产生服务流的空间限制。

图 1 3 种侧重点不同的生态系统服务流表现形式
Fig. 1 Three types of ecosystem service flows with different foci

(2) 关注数量，即侧重生态系统服务的交付和实际使用的数量。这一定义通常更强调流与供需在概念上的区分，即重点关注服务有多少被受益者使用。Villamagna 等^[22]提出一个概念框架，将生态系统服务交付的组成为服务能力、压力、需求和流。相较于 Bagstad 等^[18]提出的框架，这一框架更注重生态系统服务流在生态系统服务管理中的应用。例如，针对容量、压力不同的系统，可以通过降低压力并增加容量的方式控制流，以避免生态系统退化。类似地，Jones 等^[29]认为生态系统服务流受到服务的潜在供给和用户需求的影响，而完善生态系统服务的管理需要对潜在供给、受益者和服务价值 3 方面进行量化。强调生态系统服务的实际使用与潜在供给的区分，可以更好地为生态系统服务管理和决策提供帮助，但在对具体服务量化的过程中，区分潜在供给和实际供给仍然存在困难^[30]。当前生态系统服务的潜在供给能力通常由专家评分矩阵确定^[31]，难以和以统计数据或栅格数据为指标量化的生态系统服务使用相匹配。

(3) 关注空间，即侧重生态系统服务供给和受益的空间连接。Serna-Chavez 等^[32]基于生态系统服务流是服务的实际使用这一基本前提，提出评估流的定量框架，强调生态系统服务流只能在供给区内部及其周围有限的范围发生。相较于其他概念，这一概念更关注流发生的特定区域。例如，认为授粉服务供给区为连续的植被覆盖，受益区为受益于授粉服务的农作物分布区，因此流只能发生在昆虫等传粉生物所处的栖息地范围。这一框架继承了 Fisher 等^[33]对不同形式流的分类，明确了生态系统服务从供给区流向受益区的过程受空间限制。由于生态系统服务的供给并不能被保证全部流向需求，因此，脱离空间距离的供需匹配可能缺乏实际意义^[34]。值得注意的是，空间距离并非生态系统服务流动的唯一阻力，包括地形和政策等在内的各类自然和社会要素也会对生态系统服务流产生影响^[35]。尽管人们意识到多种因素能够影响生态系统服务在供给和受益区域间的空间连接，但在具体案例的量化、分析与评价中，许多研究往往缺乏对生态系统服务流影响因素的重点考虑^[36]。

2.2 分类体系

生态系统服务流关注的特点有所不同，其传递方式在不同研究中也较大认知差异。在具体的量化过程中，现有研究的分类方式可以概括为以下两种。

(1) 按传递方向分类。普遍认为生态系统服务流的传递方向是从供给区到使用区, 但如何确定两种区域的空间范围, 不同学者存在不同的观点。例如, 不少研究认为, 使用区即需求区, 流即是服务的实际使用量^[18, 37]。因此, 需求和供给的空间错配被认为是驱动服务从供给区流向需求区的基本动力^[38-39]。一般可以解释为, 在单元内产生的生态系统服务供给满足当地需求后, 将会按特定方向流向服务供不应求的区域。考虑到流动的阻力, 距离等因素被纳入到服务流动方向的量化中^[40-41]。在由供向需流动的基础上, 还可以通过冷热点分析对流的具体路径进行空间化^[42]。这种方式多见于受距离影响大的文化服务和受人为运输驱动影响大的供给服务。对于某些特定生态系统服务来说, 自然条件是生态系统服务流动方向的主要决定因素, 即使存在供需空间错配也难以改变。例如, 与水有关的生态系统服务, 在排除人为干预的情况下, 不受供需差异的影响, 将按照地形从高到低、从上游到下游的方向流动^[43]。

(2) 按载体不同分类。Bagstad等^[18]将生态系统服务流的载体定义为以物理单元表示的可移动的物质、能量或信息, 载体决定了流的传递形式。例如, 淡水供给、洪水调节和水质净化等服务流的载体是水, 那么其传递方向必然依照水流方向^[44-45]。而与水的密切联系也使得这一类服务容易使用水文模型进行量化, 从而提高服务流量化的准确程度^[46]。近年来, 也有部分研究开始对通过贸易货物传递的生态系统服务流进行研究^[47]。由于通过贸易货物传递的生态系统服务流载体一般是生物本身, 因此传递的服务以农产品供给为主^[48]。除了通过贸易系统流动, 生物本身也可能通过迁徙和洄游等方式移动, 从而产生生态系统服务流^[49]。尽管生物迁徙带来的生态系统服务是广泛而多样的^[50-51], 但受到观测数据的限制, 目前对物种迁徙流的量化还较为单一^[52]。相比之下, 人们对同样以生物为载体的授粉服务流认识更为充分, 能够从授粉媒介、受益作物和跨国贸易等多个方面进行评价^[53]。此外, 根据载体不同还可以将生态系统服务流分为信息流^[54]和大气流^[55]等。

生态系统服务流的不同类别是对生态系统服务流概念内涵的体现, 如按方向分类体现了流的空间属性和过程属性, 按载体分类体现了流的数量属性。对生态系统服务流的分类有助于更好地理解某项生态系统服务从产生到被使用的过程, 进而更好地量化生态系统服务流的物质量、价值量与流动路径。

3 生态系统服务流量化方式

生态系统服务流的定量刻画是识别生态系统服务供需空间关系的重要前提, 根据定义侧重的属性不同, 量化围绕数量、空间和过程3个属性展开(图2、表1)。从数量属性的角度来看, 流的量化是探究生态系统服务供给有多少流向了存在需求的使用者; 从空间属性的角度来看, 流的量化是探究生态系统服务供给与受益的使用者通过何种方式产生空间连接; 而从过程属性的角度来看, 流的量化是还原在相互联系的各要素之间流动的过程。

3.1 生态系统服务流量

生态系统服务流量的量化, 一般基于生态系统服务流是围绕生态系统服务的实际使用这一认知具体展开, 研究者通过识别和量化生态系统服务的供给、需求和实际使用, 来探究空间上生态系统服务需求的被满足程度^[56-57]。这种方式通常将理论上满足一个区域人口和经济需求所必须的服务作为需求, 使用统计数据或土地利用赋值的方式量化实际从生态系统获得的服务, 从而可以在空间上评估人类福祉通过满足生态系统服务需求的实现程度。根据服务性质和使用的指标数据的不同, 可以分为统计数据法、受惠面积法

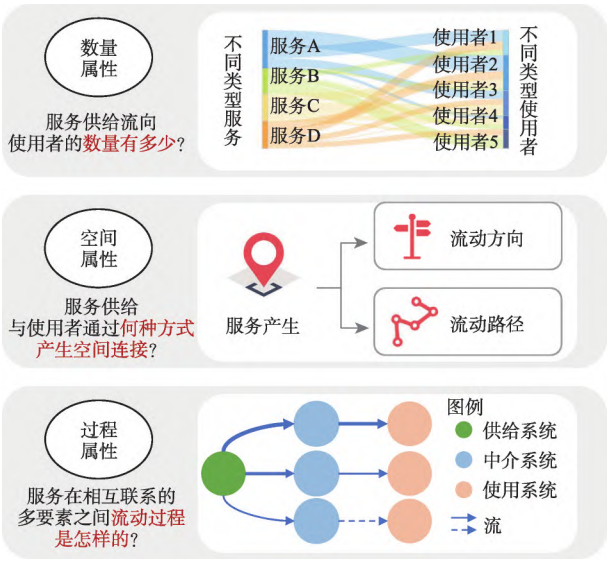


图2 生态系统服务流的量化方式

Fig. 2 Approaches to quantifying ecosystem service flows

表 1 生态系统服务流的量化方式对比

Tab. 1 Contrast of approaches to quantifying ecosystem service flows			
流的类型	概念内涵	量化方式	参考文献
关注数量的流	强调生态系统服务的交付和实际使用的数量	统计数据法：用统计数据中得到的数量表征服务流，一般用于供给服务。统计数据表征服务流量直观准确，但局限于供给服务且一般缺失对空间流动路径的刻画。	[21]、[22]、[29]、[46]、[57]
		受惠面积法：通过计算享受服务的区域面积或人口数量来表征流的数量，一般用于不便直接量化的调节服务和文化服务，在缺乏相关数据的情况下能够比较简单直观量化关键生态系统服务的受益范围，但缺乏精准性。	
关注空间的流	强调生态系统服务供给和受益的空间连接	物质质量模型模拟法：基于土地利用数据量化服务的物理量，一般用于易于直接计算实际服务量的调节服务，更好体现服务流的生态学意义，但难以从受益者角度评价流的数量在何种程度上满足其需求。	[33]、[42]、[45]
		供需差异法：考虑空间距离，认为服务由供大于需的区域就近流向供不应求的区域，通常借助引力模型和基于DEM的水流动模型刻画服务流的空间流动路径，优势是在考虑距离条件下直观连接供给与需求，但对多元影响因素的考虑仍存在不足。	
		节点连接法：将特定服务的供给和受益区抽象为供需节点，基于载体在节点间的流动表征服务的流，较好兼顾流量和流向，但获取全面的载体属性较难，因此适用的服务类型较少。	
关注过程的流	强调流从产生经过汇消耗再到使用者被消费的完整过程	固定路径法：通过河道和路网传递服务，如文化服务受益者随公路或飞机航线移动，与水有关的服务被视为沿河道传递等，固定路径的还原有助于刻画更清晰的服务流动方向，但适用的服务类型较少。	[18]、[49]
		以 ARIES 模型为代表的方式通过量化要素间相互联系的数量表征流的大小，优势是抽象化的网络关系结构可以更清晰地表征各要素间的联系程度，缺点在于一定程度上忽略了生态学意义，且空间制图仍存在不足。	
		通过构建生态系统服务的发送、接受和传输系统还原生态系统服务流的完整过程，从系统角度评估服务流的区域流动有助于从整体视角理解流的过程并更好支持决策，但数据限制导致部分类型服务(如调节服务)难以纳入该框架。	

和物质量模型模拟法。具体而言,统计数据法一般用于供给服务,以水供给服务流为例,可以将统计部门得到的用水量数据作为流量^[21]。受惠面积法一般用于不便直接衡量的调节服务和文化服务,如洪水调节和观光审美服务,通过计算享受服务的区域面积或人口来计算流^[57]。物质量模型模拟法则大多以土地利用数据为基础,使用经验模型或过程模型,确定物理量指标,量化如水质净化、土壤保持等易于直接计算实际服务物质量的调节服务^[46]。然而,单纯对生态系统服务流量的核算仅考虑了在空间单元内部的供需关系,未能考虑生态系统服务流的过程^[21]。尽管有学者通过设置有流无流的不同情景说明生态系统服务流动过程的重要性^[43],但如何从空间路径上定量刻画流动过程仍然是这一方式未能解决的问题。

3.2 生态系统服务流向

对生态系统服务流向的空间刻画围绕流的空间属性展开,目的是模拟还原生态系统服务流在空间上的流动路径。Costanza^[58]依据空间特征差异将生态系统服务分为5类,即全球非空间位置依存的、局部空间位置依存的、与方向相关的、原位的和与使用者迁移有关的服务。Fisher等^[83]根据不同生态系统服务在服务提供区和服务受益区的空间差别,划分出原位、全向和定向流。这些研究成果为生态系统服务流动路径的刻画奠定了理论基础。根据服务特点和使用数据的不同可以进一步分为供需差异法、节点连接法和固定路径法。由于供需差异是生态系统服务流动的基础,因此不少研究从供需差异的角度对服务流进行刻画。如Shi等^[42]以行政区为基本单元量化供需的冷热点,以就近原则将供给盈余区的服务传递到供不应求的区域。然而,简单的供需热点空间连接在一定程度上缺乏过程性意义,因为特定生态系统服务的供给未必能准确流向需求最高的区域。借助载体在供需节点之间的流动路径刻画服务流向成为一种解决途径。例如,以水为载体量化淡水供给和水质净化服务的流向^[45],或通过道路和供需节点量化粮食供给服务的流向^[59]。基于载体刻画的流向可以兼顾流量,从而更好地服务管理决策。固定路径法则主要用于一些具有固定路径的服务(如沿河道和路网传递的服务)确定其方向和具体路径。但总体来说,同时兼顾生态系统服务流的数量和空间属性,仍属于当前研究的一大瓶颈。

3.3 生态系统服务流过程

对生态系统服务流过程的还原围绕生态系统服务流的过程属性展开,目的是探究流如何将生态系统服务流过程中的不同要素联系起来。一方面,可以通过量化要素间相互联系的数量表征流的大小。如Bagstad等^[18]使用ARIES(Artificial Intelligence for Ecosystem Services)框架模拟了生态系统服务从供给区到受益区的流动过程。但由于模型较为复杂,且难以表达受益者的实际使用,并一定程度上忽略了生态学过程,在近年来的研究中普及性不高^[28,60]。另一方面,通过构建生态系统服务的发送、接收和传输系统,还原生态系统服务流的完整过程。如Kleemann等^[49]将所有可能提供服务的区域视为发送系统,将受益区域定义为接收系统,通过数据库量化了发送系统和接收系统之间传递的服务,来表述区域间流的过程。然而,由于数据可用性限制等原因,在表述流过程的同时兼顾流的数量和空间属性仍具有挑战性。

3.4 生态系统服务流研究框架

目前研究围绕生态系统服务流的数量、空间和过程进行了定量化研究,推动了人们对生态系统服务流的认识。然而,生态系统服务流的量化还存在一些不足。首先,对影响流的因素考虑不充分。基于供需差异的流的量化容易描述生态系统服务的流动路径,但忽略了许多过程因素^[42]。如土地利用(类型与强度)变化、气候变化、污染排放和人口产业变化等因素都将通过改变生态系统服务的供需关系影响服务流过程^[61-64],交通设施

与信息平台的建设、利益相关者之间的不对等权力关系及其变化通过改变服务流的传递路径和数量进而影响服务流过程^[49, 54, 65]。基于过程模型的引入在一定程度上弥补了这一缺陷,但从整体上看,大部分研究还未能探究生态系统服务流的动力因素和阻力因素。事实上,生态系统服务的供需差异是流动不均衡的结果,而非产生流的原因。其次,忽略了流的时间动态。掌握生态系统服务在季节间的流动差异对于提高整体生态系统服务和人类福祉具有重要意义,但目前生态系统服务领域被广泛使用的InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 模型工具通常以年为步长运行,而经济社会统计数据也大多以年为基本单位,模型和数据的限制可能导致忽略生态系统服务流季节间的动态变化^[60]。最后,目前对流的量化还未能关注供给、需求和利益相关者群体的空间关系。如何针对流的过程属性,充分表征生态系统服务流过程中涉及到的各类动力因素、阻力因素和中介因素,是目前亟需解决的问题。

生态系统服务研究本质上应该服务于生态系统管理中实际问题的有效解决,但现有研究内容大多停留在对研究对象的客观描述与科学假设的实证检验,尚未形成从理论创新到实践成果转化的完整框架。生态系统服务流的量化以供需关系评估为基础,同时能够定量刻画生态系统服务的空间转移,有助于决策者从过程角度解决供需错配问题并做出优化决策。面向可持续发展目标,整合生态系统服务供给、需求和流对于景观管理决策和政策制定具有重要作用^[21]。生态系统服务流研究应在概念探讨的基础上,以超越时空格局的量化形式,推动生态系统服务在实践层面的深化应用。本研究以问题为导向,基于“评估—行动—愿景”的逻辑思路,提出一个从研究基础到应用领域再到目标实现的系统研究框架(图3),以搭建生态系统服务供需和决策的连接桥梁。

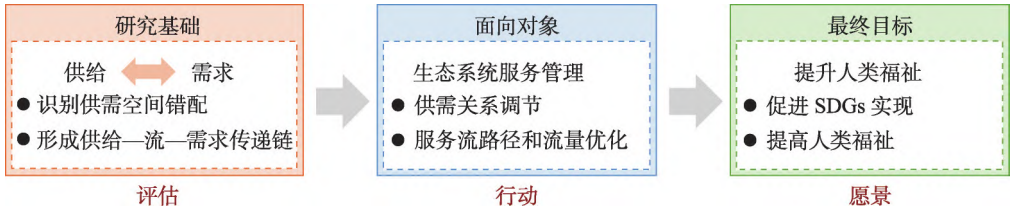


图3 生态系统服务流研究框架

Fig. 3 Framework for ecosystem service flows research

(1) 生态系统服务流的研究基础是对生态系统服务供给与需求的评估^[64, 66]。生态系统服务供给被认为是特定区域提供生态系统服务的能力^[67-68]。评估生态系统服务供给相当于对特定地区特定时期的生物物理特性进行评价,反映了生态系统为人类提供服务的能力^[64, 69]。生态系统服务需求被认为是特定时期特定地区需要或期望的服务量^[22, 70]。与生态系统服务供给更多反映生态系统状况不同,由于需求的主体必须是人类受益者,需求侧评估大多需要通过统计、建模、社会经济监测或访谈等方式量化受益者对服务的实际使用^[67]。并且由于需求与社会—生态系统的各个部分都有着复杂联系,实际上更应该反映受益者对服务的偏好和欲望^[71]。从供给到需求是生态系统服务流的基本流动方向之一,流的研究为解决供需空间错配提供了途径。在研究单元内,通过评估生态系统服务的供给与需求,识别其空间错配与盈亏,能够形成生态系统服务供给—流—需求的传递链^[72-73]。

(2) 生态系统服务流研究应面向生态系统服务管理行动。通常,生态系统服务供给与需求的热点区在不同尺度上均表现出一定的可预测性。例如,供给高的区域普遍分布于郊区等远离人类活动的位置,需求高的区域大多位于人口集中的城镇或是人类活动聚集的位置^[74-76]。这意味着,通过生态系统服务供需评估所识别的服务供需热点区域,往往

鲜有超越一般认知的突破性发现,难以进一步支撑生态系统可持续管理的精细化决策。而以生态系统服务供需评估为基础的生态系统服务流研究,则能够弥补生态系统服务供需在实践层面的不足^[77-78]。生态系统服务管理可以被理解为通过调节生态系统服务供需权衡和流,实现生态系统服务在供给效率和分配公平方面的改善^[36, 79]。具体地,可以通过景观格局优化^[80]、生态系统服务付费^[81]和生态移民^[82]等多种方式调节供需关系。目前生态系统服务流的研究还未能在生态系统服务管理案例中得到良好应用,有必要进一步发挥生态系统服务流在供需连接方面的优势,建立交付渠道,进而探索基于生态系统服务流的生态系统管理^[59]。如通过流连接生态系统服务的供给者与受益者从而制定生态补偿方案^[45],或通过上下游生态系统服务流动关系确定土地利用优化政策^[25]。

(3) 生态系统服务流研究的最终目标愿景应该是提升人类福祉并实现可持续性。生态系统服务连接景观格局、过程与人类福祉,是景观可持续性研究的重要内容^[83]。而景观可持续性科学研究的最终目的,也是为了促进生态系统服务和人类福祉的长期维系与可持续改善^[84]。因此,生态系统服务流作为生态系统服务研究的前沿议题,有必要继承学科在可持续科学领域的支撑作用。同时,千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)指出了生态系统服务与人类福祉的密切联系^[3],联合国可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)也被认为可以通过提高生态系统服务的方式促进实现^[85]。生态系统服务流具有对生态系统服务供给、需求和消费的连接属性,因此相关研究更应该整合供给、需求和实际使用,聚焦生态系统服务流对于提升人类福祉和实现可持续性的贡献作用^[86]。例如,可以通过情景模拟探究生态系统服务流路径和数量分配对提高人类福祉贡献的最优解^[59],或将生态系统服务流更好地与社会经济发展相联系,从而遴选促进SDGs目标实现的最优方案^[87]。

4 生态系统服务流研究展望

开篇
自Bagstad等^[18]将生态系统服务流概念引入以来,对于流的研究近年来逐渐增多^[88]。从概念内涵来看,生态系统服务流具有数量、空间和过程3个属性,可以根据传递方向和载体的不同进行分类。从定量刻画方法来看,分别通过对生态系统服务实际使用数量、空间传递过程与要素相互关系的表征,评估生态系统服务流。而在实践应用方面,生态系统服务流作为生态系统服务供需评估的出口,有助于更好实现面向生态系统服务提升的资源调配,从而服务于提高人类福祉和可持续性这一最终目标。目前,对于生态系统服务流的研究,从定量刻画角度,仍然缺乏标准化的有效途径;从管理行动角度,对中介因素尤其是利益相关者施加的影响仍然考虑不足;从目标愿景角度,将流纳入政策制定的路径仍需完善。因此,需要重点关注生态系统服务流的生态学意义、利益相关者角色和面向人类福祉提升的可持续决策系统3个方面,进一步深入生态系统服务流研究(图4)。

4.1 整合生态系统服务流的生态学意义与地理空间过程

生态系统服务的流量和流向是这一研究方向的两个基本问题,但目前研究在这两方面仍存在瓶颈。在生态系统服务流量的量化方面,部分研究仅注重服务的数字化表达,忽略流的生态学意义。生态系统服务作为连接社会系统和生态系统的桥梁,仅通过指标量化其数值难以从生态学内涵理解生态系统服务流产生的原因、结果和潜在的优化方式。在生态系统服务流向的表达方面,部分研究过于注重其空间表达,而非各要素间的地理空间关系。生态系统服务供给的空间差值并不能真正还原生态系统服务流的实际过

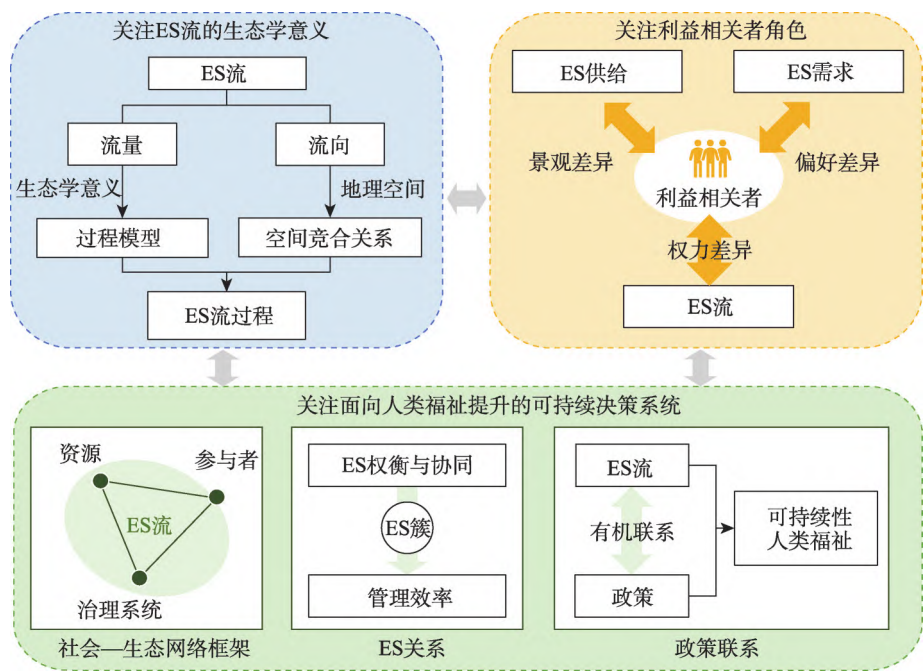


图4 生态系统服务流研究展望
Fig. 4 Prospects for ecosystem service flows research

程，关注空间关系（例如水流决定的上下游关系）才能明确生态系统服务流的真实流向。抽离生态学内涵和空间关系的数字计量既难以分析流的影响因素，又不能指导生态系统服务管理、提升人类福祉。

针对现有研究不足，未来研究应充分整合生态系统服务流的生态学内涵及其在空间上的竞合关系。一方面，需要开发基于过程的动态模型，更好地从生态学视角审视生态系统服务的流动过程^[25]。例如，围绕水、大气和生物等载体，引入常用的过程模型或开发新的模型精量化生态系统服务流^[25, 89]。另一方面，生态系统服务流研究应该进一步聚焦其在多个受益者之间的权衡^[48]。比如淡水供给服务流在流域上下游路径上存在权衡，上游服务流量的增加会导致下游服务流量的减少^[90]。理解生态系统服务流在空间上的竞合关系有助于更好地调配生态系统服务流在不同路径上的通量，丰富生态系统服务管理手段。此外，对于如文化服务等与人类行为高度关联的服务类型，可以聚焦不同生态系统提供服务的能力差异，在采取参与式评估方法评价其供给和需求的同时，进一步融合时空大数据等新兴分析方法，基于人群流动视角建立人与自然的空间联系。例如，将人在享受文化服务过程中的移动路线作为服务的流动路径，能够在空间上刻画供给区与受益者的联系^[20]。同时，随着网络媒体的不断发展，通过社交媒体网络等不同形式媒体传播的文化服务流也应得到更多关注，围绕文化服务信息流进行更充分的探索^[49]。最后，要将服务流在数量上的生态学意义与在空间上的竞合关系整合到生态系统服务流过程的研究，以更准确量化受益者在不同因素影响条件下实际使用的服务数量及其需求的满足程度，形成“评估—行动—愿景”级联的生态系统服务流研究范式。

4.2 充分考虑不同利益相关者在生态系统服务流过程中的多重角色

在生态系统服务流的探究过程中，除了要关注自然要素间的关系，更需要考虑人类在生态系统服务流过程中的重要地位。生态系统服务的核心思想是生态系统有益于人类

福祉^[15], 而生态系统服务流则试图探究人们到底使用了多少生态系统服务, 因此考虑利益相关者的类型特点和空间关系在生态系统服务流的探究中具有重要意义。尽管人类活动对于生态系统服务流过程的各方面存在不同程度的影响已经成为共识^[27], 但已有研究还未能充分评估利益相关者与生态系统服务流过程中供给、需求和流的相互影响。例如, 自然景观为人类同时提供了水产品供给服务和游憩观光服务, 但部分利益相关者群体通过水产养殖开发提高收益的同时降低了自然景观的观光服务价值^[91]。这意味着不同群体对不同服务的需求存在差异, 并可能通过自身行为影响多种服务供给。此外, 利益相关者对服务使用和管理的权力不对称也极大影响了服务的流动^[92]。若仅从受益者数量和空间位置等角度评估生态系统服务流, 则难以还原不同群体对于不同服务需求的差异化满足程度。

因此, 未来涉及生态系统服务流的研究应整合多重利益相关者在生态系统服务供给、需求和流动过程中与生态系统的交互影响。首先, 尝试从利益相关者视角, 分类评估不同群体对于不同生态系统服务的偏好和需求满足程度^[93]。不同收入背景和利益关系导致不同群体对供给服务和文化服务的态度可能具有巨大差异, 因此评估利益相关者的偏好与需求满足程度十分重要^[91]。其次, 应评估不同群体行为对生态系统服务供给和流向的动态影响^[94]。最后, 从长时间尺度评估不同利益相关者群体影响下的动态服务流。生态系统服务流的结果必然是生态系统运行和利益相关者干预的共同结果, 充分考虑利益相关者群体对生态系统服务流的影响有助于更好地制定针对生态系统服务流的生态系统管理策略^[69]。

4.3 将生态系统服务流调控纳入提升人类福祉的**可持续决策系统**

生态系统服务流研究应面向生态系统服务管理, 而最终目标应该是提升人类福祉并实现可持续性。因此, 应将生态系统服务流调控纳入提升人类福祉的可持续决策系统, 以赋予生态系统服务流研究更丰富的实践意义^[95]。然而, 已有研究大多未能将生态系统服务流纳入决策系统, 难以有效解决实际问题。因此, 有必要在基于生态系统服务供需评价的研究框架基础上, 提出应用于决策的实现路径。

首先, 可以将生态系统服务流研究在社会—生态网络框架下展开, 以发挥生态系统服务流的连接作用优势^[78]。**社会—生态网络包含资源、治理系统和参与者等3个核心子系统^[96]**, 而生态系统服务流则可以作为连接资源和参与者系统并作用于治理系统的纽带。例如, 通过生态系统服务流厘清区域生态系统服务供需的空间格局与流动现状, 通过政府或市场调配自然资源以满足生态系统服务在区域内的合理分配。其次, 面向生态系统服务供给不足和供需错配等关键问题, 探究生态系统服务簇在流动状态下的关系变化, 以推动生态系统服务的管理效率提升。由于不同生态系统服务间存在密切的权衡协同关系, 因此在区域尺度进行生态整合具有必要性^[97]。以生态系统服务簇演化探究生态系统服务流的时空动态, 遴选调节生态系统服务流向和流量的最优情景, 有助于提高决策效率。最后, 应建立生态系统服务流与政策的有机联系。一方面, 公众的理解、支持和参与是实现生态系统服务有效管理的重要前提, 而可视化的生态系统服务流是吸引其参与其中的重要保障; 可以通过可视化模型等方式, 帮助决策者和公众更好理解生态系统服务流的内涵和实践意义, 促进利益相关方对政策的推动与支持。另一方面, 使用生态系统服务流作为指标评估已有政策实施效果, 更有助于政府部门开展政策动态调整。生态系统服务流评估应着重考虑政府部门已有生态环境保护政策, 通过设计干预生态系统服务流的方法等方式形成可操作性建议, 完善相关政策措施。

5 结 论

作为生态系统服务研究的前沿方向,生态系统服务流研究从地理学视角强调生态系统服务的空间传递过程,将生态系统服务的研究内容聚焦于服务从供给区供给到受益者消费的转换过程,以及供给与需求在空间上的匹配。当前,生态系统服务流研究仍处于早期阶段,存在较为明显的研究局限。不同学者对于生态系统服务流在概念内涵理解和评估方法选取等方面各有创新,但大多研究都未能实现从理论研究向实践应用的拓展。本研究立足生态系统服务流连接供给与需求这一基本共识,提出以生态系统服务供需评估为基础、管理行动为手段、提升人类福祉及其可持续性为目标愿景的系统研究框架,重点关注如何基于生态系统服务流解决生态系统管理实践问题。针对生态系统服务流研究重空间路径轻生态学内涵、重数量评估轻驱动影响的不足,本文提出生态系统服务流研究的3点展望。① 生态系统服务流研究应当聚焦生态学意义与地理空间关系,厘清实际需求、潜在供给和实际使用的概念内涵,以便促进各方理解,奠定统一的生态系统服务流的实践认知基础;② 要充分考虑不同利益相关者对生态系统服务供给、需求和流的差异性影响,强化生态系统服务流与生态系统管理的紧密联系;③ 要将生态系统服务流纳入面向人类福祉提升的可持续决策系统,推动科学研究与实践应用的紧密结合,将生态系统服务流研究推向更广阔的发展前景与实践空间。

参考文献(References)

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] Adhikari K, Hartemink A E. Linking soils to ecosystem services: A global review. *Geoderma*, 2016, 262: 101-111.
- [5] Harrison P A, Berry P M, Simpson G, et al. Linkages between biodiversity attributes and ecosystem services: A systematic review. *Ecosystem Services*, 2014, 9: 191-203.
- [6] Thom D, Seidl R. Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews*, 2016, 91(3): 760-781.
- [7] Bommarco R, Kleijn D, Potts S G. Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(4): 230-238.
- [8] Rogers A D, Frinault B A V, Barnes D K A, et al. Antarctic futures: An assessment of climate-driven changes in ecosystem structure, function, and service provisioning in the Southern Ocean. *Annual Review of Marine Science*, 2020, 12(1): 87-120.
- [9] Peng J, Liu Y X, Wu J S, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen city, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 56-68.
- [10] Lovell S T, Taylor J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [11] Hansen R, Pauleit S. From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. *Ambio*, 2014, 43(4): 516-529.
- [12] Costanza R, de Groot R, Braat L, et al. 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.
- [13] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of ecosystem services: Putting the issues in perspective. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 67-72.
- [14] Gómez-Baggethun E, Ruiz-Pérez M. Economic valuation and the commodification of ecosystem services. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2011, 35(5): 613-628.

- [15] Jax K, Barton D N, Chan K M A, et al. Ecosystem services and ethics. *Ecological Economics*, 2013, 93: 260-268.
- [16] Rodríguez J, Beard J, Bennett E, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): art28. DOI: 10.5751/ES-01667-110128.
- [17] Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 960-973. [彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.]
- [18] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [19] Bagstad K J, Villa F, Batker D, et al. From theoretical to actual ecosystem services: Mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecology and Society*, 2014, 19(2): art64. DOI: 10.5751/ES-06523-190264.
- [20] Egarter Vigl L, Depellegrin D, Pereira P, et al. 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.
- [21] Schirpke U, Candiago S, Egarter Vigl L, et al. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 928-941.
- [22] 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.
- [23] Xiao Yu, Xie Gaodi, Lu Chunxia, et al. Involvement of ecosystem service flow in human wellbeing based on the relationship between supply and demand. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 3096-3102. [肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 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.]
- [24] Yao Jing, He Xingyuan, Chen Wei. The latest progress in ecosystem service flow research methods. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 335-342. [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.]
- [25] Wang L J, Zheng H, Chen Y Z, et al. Systematic review of ecosystem services flow measurement: Main concepts, methods, applications and future directions. *Ecosystem Services*, 2022, 58: 101479. DOI: 10.1016/j.ecoser.2022.101479.
- [26] Peng J, Xia P, Liu Y X, et al. Ecosystem services research: From golden era to next crossing. *Transactions in Earth, Environment, and Sustainability*, 2023, 1(1): 9-19.
- [27] Liu Huimin, Liu Lvyi, Ding Shengyan. The impact of human activities on ecosystem services flow. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3232-3242. [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.]
- [28] Ochoa V, Urbina-Cardona N. Tools for spatially modeling ecosystem services: Publication trends, conceptual reflections and future challenges. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 155-169.
- [29] Jones L, Norton L, Austin Z, et al. Stocks and flows of natural and human-derived capital in ecosystem services. *Land Use Policy*, 2016, 52: 151-162.
- [30] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [31] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [32] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [33] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [34] Schröter M, Kraemer R, Remme R P, et al. Distant regions underpin interregional flows of cultural ecosystem services provided by birds and mammals. *Ambio*, 2020, 49(5): 1100-1113.
- [35] Mandle L, Wolny S, Bhagabati N, et al. Assessing ecosystem service provision under climate change to support conservation and development planning in Myanmar. *Plos One*, 2017, 12(9): e0184951. DOI: 10.1371/journal.pone.0184951.
- [36] Xu Z H, Peng J. Ecosystem services-based decision-making: A bridge from science to practice. *Environmental Science & Policy*, 2022, 135: 6-15.
- [37] Peng J, Wang X Y, Liu Y X, et al. Urbanization impact on the supply-demand budget of ecosystem services: Decoupling

- analysis. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101139. DOI: 10.1016/j.ecoser.2020.101139.
- [38] Erdozain M, Freeman E C, Ouellet D C, et al. Demand for provisioning ecosystem services as a driver of change in the Canadian boreal zone I. *Environmental Reviews*, 2019, 27(2): 166-184.
- [39] Xia P, Chen B X, Gong B H, et al. The supply and demand of water purification service in an urbanizing basin on the Tibetan Plateau. *Landscape Ecology*, 2022, 37(7): 1937-1955.
- [40] Rioux J F, Cimon-Morin J, Pellerin S, et al. How land cover spatial resolution affects mapping of urban ecosystem service flows. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, 7: 93. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00093.
- [41] Zhai T L, Zhang D, Zhao C C. How to optimize ecological compensation to alleviate environmental injustice in different cities in the Yellow River Basin? A case of integrating ecosystem service supply, demand and flow. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75: 103341. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103341.
- [42] Shi Y S, Shi D H, Zhou L L. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106418. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106418.
- [43] Liu J Y, Qin K Y, Xie G D, et al. Is the 'water tower' reassuring? Viewing water security of Qinghai-Tibet Plateau from the perspective of ecosystem services 'supply-flow-demand'. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(9): 094043. DOI: 10.1088/1748-9326/ac8c57.
- [44] Maes W H, Heuvelmans G, Muys B. Assessment of land use impact on water-related ecosystem services capturing the integrated terrestrial-aquatic system. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(19): 7324-7330.
- [45] Lin J Y, Huang J L, Hadjikakou M, et al. Reframing water-related ecosystem services flows. *Ecosystem Services*, 2021, 50: 101306. DOI: 10.1016/j.ecoser.2021.101306.
- [46] Togbévi Q F, Bossa A Y, Yira Y, et al. A multi-model approach for analysing water balance and water-related ecosystem services in the Ouriyori Catchment (Benin). *Hydrological Sciences Journal*, 2020, 65(14): 2453-2465.
- [47] Drakou E G, Virdin J, Pendleton L. Mapping the global distribution of locally-generated marine ecosystem services: The case of the West and Central Pacific Ocean tuna fisheries. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 278-288.
- [48] Klapper J, Schröter M. Interregional flows of multiple ecosystem services through global trade in wild species. *Ecosystem Services*, 2021, 50: 101316. DOI: 10.1016/j.ecoser.2021.101316.
- [49] Kleemann J, Schröter M, Bagstad K J, et al. Quantifying interregional flows of multiple ecosystem services: A case study for Germany. *Global Environmental Change*, 2020, 61: 102051. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102051.
- [50] Bauer S, Hoyer B J. Migratory animals couple biodiversity and ecosystem functioning worldwide. *Science*, 2014, 344(6179): 1242552. DOI: 10.1126/science.1242552.
- [51] Semmens D J, Diffendorfer J E, López-Hoffman L, et al. Accounting for the ecosystem services of migratory species: Quantifying migration support and spatial subsidies. *Ecological Economics*, 2011, 70(12): 2236-2242.
- [52] Bagstad K J, Semmens D J, Diffendorfer J E, et al. Ecosystem service flows from a migratory species: Spatial subsidies of the northern pintail. *Ambio*, 2019, 48(1): 61-73.
- [53] Silva F D S, Carvalho L G, Aguirre-Gutiérrez J, et al. Virtual pollination trade uncovers global dependence on biodiversity of developing countries. *Science Advances*, 2021, 7(11): eabe6636. DOI: 10.1126/sciadv.abe6636.
- [54] Schröter M, Koellner T, Alkemade R, et al. Interregional flows of ecosystem services: Concepts, typology and four cases. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 231-241.
- [55] Xu J, Xiao Y, Xie G D, et al. Computing payments for wind erosion prevention service incorporating ecosystem services flow and regional disparity in Yanchi county. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 563-579.
- [56] Taboada A, García-Llamas P, Fernández-Guisuraga J M, et al. Wildfires impact on ecosystem service delivery in fire-prone maritime pine-dominated forests. *Ecosystem Services*, 2021, 50: 101334. DOI: 10.1016/j.ecoser.2021.101334.
- [57] Vallecillo S, La Notte A, Ferrini S, et al. How ecosystem services are changing: An accounting application at the EU level. *Ecosystem Services*, 2019, 40: 101044. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.101044.
- [58] Costanza R. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350-352.
- [59] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, et al. The tradeoffs between food supply and demand from the perspective of ecosystem service flows: A case study in the Pearl River Delta, China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113814. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113814.
- [60] Sharps K, Masante D, Thomas A, et al. Comparing strengths and weaknesses of three ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment. *Science of The Total Environment*, 2017, 584/585: 118-130.

- [61] Wang Jun, Dun Yaolong. A review on the effects of land use change on ecosystem services. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(5): 798-808. [王军, 顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 798-808.]
- [62] Doney S C, Ruckelshaus M, Duffy J E, et al. Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 11-37.
- [63] Beaumont N J, Aanesen M, Austen M C, et al. Global ecological, social and economic impacts of marine plastic. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 142: 189-195.
- [64] Wei H J, Fan W G, Wang X C, et al. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: A review. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
- [65] Brauman K A, Garibaldi L A, Polasky S, et al. Global trends in nature's contributions to people. *PNAS*, 2020, 117(51): 32799-32805.
- [66] González-García A, Palomo I, González J A, et al. Quantifying spatial supply-demand mismatches in ecosystem services provides insights for land-use planning. *Land Use Policy*, 2020, 94: 104493. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104493.
- [67] Burkhard B, Kandziora M, Hou Y, et al. Ecosystem service potentials, flows and demands: Concepts for spatial localisation, indication and quantification. *Landscape Online*, 2014, 34: 1-32.
- [68] Ma Lin, Liu Hao, Peng Jian, et al. A review of ecosystem services supply and demand. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1277-1289. [马琳, 刘浩, 彭建, 等. 生态系统服务供给和需求研究进展. *地理学报*, 2017, 72(7): 1277-1289.]
- [69] Martín-López B, Montes C. Restoring the human capacity for conserving biodiversity: A social-ecological approach. *Sustainability Science*, 2015, 10(4): 699-706.
- [70] Mouchet M A, Lamarque P, Martín-López B, et al. An interdisciplinary methodological guide for quantifying associations between ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 298-308.
- [71] 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.
- [72] 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. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.100946.
- [73] He S, Su Y, Shahtahmassebi A R, et al. Assessing and mapping cultural ecosystem services supply, demand and flow of farmlands in the Hangzhou metropolitan area, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 756-768.
- [74] Chen J Y, Jiang B, Bai Y, et al. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1426-1439.
- [75] Lorilla R S, Kalogirou S, Poirazidis K, et al. Identifying spatial mismatches between the supply and demand of ecosystem services to achieve a sustainable management regime in the Ionian Islands (Western Greece). *Land Use Policy*, 2019, 88: 104171. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104171.
- [76] Wu X, Liu S L, Zhao S, et al. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1375-1386.
- [77] Feurer M, Rueff H, Celio E, et al. Regional scale mapping of ecosystem services supply, demand, flow and mismatches in southern Myanmar. *Ecosystem Services*, 2021, 52: 101363. DOI: 10.1016/j.ecoser.2021.101363.
- [78] Metzger J P, Fidelman P, Sattler C, et al. Connecting governance interventions to ecosystem services provision: A social-ecological network approach. *People and Nature*, 2021, 3(2): 266-280.
- [79] Egoh B N, Reyers B, Rouget M, et al. Identifying priority areas for ecosystem service management in South African grasslands. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1642-1650.
- [80] Mitchell M G E, Suarez-Castro A F, Martinez-Harms M, et al. Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(4): 190-198.
- [81] Farley J, Costanza R. Payments for ecosystem services: From local to global. *Ecological Economics*, 2010, 69(11): 2060-2068.
- [82] Ruckelshaus M, Doney S C, Galindo H M, et al. Securing ocean benefits for society in the face of climate change. *Marine Policy*, 2013, 40: 154-159.
- [83] Huang Lu, Wu Jianguo, Wang Ke, et al. Sustainable landscape planning: integrating landscape sustainability research with GeoDesign. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 442-449. [黄璐, 邬建国, 王珂, 等. 可持续景观规划: 融合景观可持续性研究与地理设计. *生态学报*, 2022, 42(2): 442-449]

- [84] Wu Jianguo, Guo Xiaochuan, Yang Jie, et al. What is sustainability science? *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 1-11. [邬建国, 郭晓川, 杨杰, 等. 什么是可持续性科学? *应用生态学报*, 2014, 25(1): 1-11.]
- [85] Wood S L R, Jones S K, Johnson J A, et al. Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 70-82.
- [86] Xu Z H, Wei H J, Fan W G, et al. Relationships between ecosystem services and human well-being changes based on carbon flow: A case study of the Manas River Basin, Xinjiang, China. *Ecosystem Services*, 2019, 37: 100934. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.100934.
- [87] Yin C C, Zhao W W, Cherubini F, et al. Integrate ecosystem services into socio-economic development to enhance achievement of sustainable development goals in the post-pandemic era. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1): 68-73.
- [88] Chalkiadakis C, Drakou E G, Kraak M J. Ecosystem service flows: A systematic literature review of marine systems. *Ecosystem Services*, 2022, 54: 101412. DOI: 10.1016/j.ecoser.2022.101412.
- [89] Charles M, Ziv G, Bohrer G, et al. Connecting air quality regulating ecosystem services with beneficiaries through quantitative serviceshed analysis. *Ecosystem Services*, 2020, 41: 101057. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.101057.
- [90] Lu Z X, Wei Y P, Xiao H L, et al. Trade-offs between midstream agricultural production and downstream ecological sustainability in the Heihe River basin in the past half century. *Agricultural Water Management*, 2015, 152: 233-242.
- [91] Outeiro L, Villasante S, Oyarzo H. The interplay between fish farming and nature based recreation-tourism in Southern Chile: A perception approach. *Ecosystem Services*, 2018, 32: 90-100.
- [92] Felipe-Lucia M R, Martín-López B, Lavorel S, et al. Ecosystem services flows: Why stakeholders' power relationships matter. *Plos One*, 2015, 10(7): e0132232. DOI: 10.1371/journal.pone.0132232.
- [93] Wilhelm J A, Smith R G, Jolejole-Foreman M C, et al. Resident and stakeholder perceptions of ecosystem services associated with agricultural landscapes in New Hampshire. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101153. DOI: 10.1016/j.ecoser.2020.101153.
- [94] Karrasch L, Klenke T, Kleyer M. Land-use elements and attributed ecosystem services: An archetype approach to land-use evaluation at the German North Sea coast. *Ecology and Society*, 2019, 24(2): art13. DOI: 10.5751/ES-10744-240213.
- [95] Wang Jiali, Zhou Weiqi. Ecosystem service flows: Recent progress and future perspectives. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4213-4222. [王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展. *生态学报*, 2019, 39(12): 4213-4222.]
- [96] Ban N C, Evans L, Nenadovic M, et al. Interplay of multiple goods, ecosystem services, and property rights in large social-ecological marine protected areas. *Ecology and Society*, 2015, 20(4): art2. DOI: 10.5751/ES-07857-200402.
- [97] Li K, Hou Y, Andersen P S, et al. An ecological perspective for understanding regional integration based on ecosystem service budgets, bundles, and flows: A case study of the Jinan metropolitan area in China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114371. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114371.

Conceptual connotation and quantification methods of ecosystem service flows

XIA Pei¹, PENG Jian¹, XU Zihan², GU Tianwei³, WANG Jiabin⁴

(1. Ministry of Education Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Guangzhou Urban Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China; 4. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: Ecosystem service flows indicate the actually-used services, which act as a link between ecosystem services supply and demand. For effective practical application, it is crucial to understand and clarify its concept and quantification methods. In recent years, the concept of ecosystem service flows has received more and more attention, but there is still a lack of a systematic review connecting the conceptual connotation, quantification method and practical application. Therefore, in order to strengthen the practical significance of ecosystem service supply and demand assessment, and to make up for the limitation of current research, we clarify the conceptual definition of ecosystem service flows based on the perspectives of process, quantity and space, summarize the quantitative methodology of ecosystem services and explore a systematic framework for research of ecosystem service flows. Focusing on the ecological significance and geospatial processes, stakeholder roles and decision-making systems for human well-being enhancement, this paper suggests establishing a systematic research framework of 'ecosystem services supply and demand assessment-ecosystem services management action-human well-being enhancement vision', which is projected to propel a broader prospect and practical domain for future research of ecosystem service flows.

Keywords: ecosystem service flows; supply and demand assessment; stakeholders; human well-being; ecosystem services management