

生态系统服务流量化研究进展

刘慧敏^{1,2} 刘绿怡^{1,2} 任嘉衍^{1,2} 卞子元^{1,2} 丁圣彦^{1,2*}

(¹河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南开封 475004; ²河南大学环境与规划学院, 河南开封 475004)

摘要 生态系统服务流对生态系统服务的形成、输送、转化和维持等均有重要作用,且能够在生态系统服务的供需之间建立时空连接,对生态系统服务流的量化有利于生态系统服务的准确评估,对生态系统保育和管理以及制定积极有效的生态补偿等具有重要意义.本文阐述了生态系统服务流的理论基础,在总结不同学者对生态系统服务流定义的前提下,分析了量化服务流的侧重点,并对生态系统服务流进行分类;探讨了影响生态系统服务流量化的关键因素,分析了生态系统服务供给、流和需求之间的相互作用关系;提出了生态系统服务流量化的具体过程,并详细介绍了各个步骤.

关键词 生态系统服务流; 供需耦合; 量化; 生态系统服务价值

Progress of quantitative analysis of ecosystem service flow. LIU Hui-min^{1,2}, LIU Lyu-yi^{1,2}, REN Jia-yan^{1,2}, BIAN Zi-qi^{1,2}, DING Sheng-yan^{1,2*} (¹Ministry of Education Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Kaifeng 475004, Henan, China; ²College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China).

Abstract: Ecosystem services flow plays an important role in the generation, delivery, transformation and maintenance of ecosystem services. It can establish spatial connections between the supply and demands of ecosystem services. The quantification of ecosystem services flow is conducive to assess ecosystem services accurately, and has great significance on the conservation and management of ecosystems, and effective development of ecological compensation. This paper analyzed the theoretical basis of ecosystem services flow, summarized definitions of ecosystem services flow that proposed by different scholars to analyze their emphases on quantifying services flow, and then classifying ecosystem services flow. Key factors that might influence the quantification of ecosystem services flow were discussed to analyze the interactions among supply, fluxion and demands of ecosystem services flow. The specific process of quantification of ecosystem services flow was proposed, and each step was introduced in detail.

Key words: ecosystem services flow; supply and demand coupling; quantitative; ecosystem service value.

生态系统服务(ecosystem services, ES)是人类直接或间接地从生态系统中获得的产品或惠益^[1],千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)将生态系统服务分为供给、调节、支持和文化服务4大类^[2].生态系统服务能够将生态系统功能与过程和人类社会联系起来,对人类福祉至关重要^[3].随着全球人口的剧增,过度的资源消耗给生态环境造成了极大压力,将生态系统服务价值评估

整合到生态管理中尤为必要^[4].生态系统服务评估能够量化说明生态系统服务对人类福祉的重要性程度^[5],可为政策制定者们提供生态系统管理的可靠信息.然而由于缺乏对生态系统服务产生机制、传递过程等的全面认识,大部分生态系统服务价值量化结果的现实有效性不强^[6],在生态系统服务管理方面的指导作用也极其有限.学者们开始将研究角度转向生态系统服务的需求方面^[7],但简单的生态系统服务供需平衡研究仍存在供需空间不匹配的问题^[8].生态系统服务流能够有效耦合具有空间异质性特征的生态系统服务的供需,对生态系统服务流

本文由国家自然科学基金项目(41371195)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41371195). 2017-01-20 Received, 2017-04-27 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: syding@henu.edu.cn

的量化是解决当前生态系统服务价值评估不精确的突破口.但目前为止,对生态系统服务流的量化研究数量极少,参考有限.

本文综述了生态系统服务流定义及其特征,总结了与服务流相关的概念,如生态系统服务的供给与需求等;区分了生态系统服务的潜在供给与实际供给,以及生态系统服务的使用和需求等;分析了生态系统服务流传递过程中所经过空间单元之间的关系,探讨了生态系统服务供给、流和需求在实际研究过程中存在的联系;总结了生态系统服务流量化研究的基本步骤,并构建了供给服务、调节服务和支撑服务的供给潜力、流和需求量化指标;提出了生态系统服务流量化过程中存在的问题,并对未来生态系统服务流研究及其量化进行展望.对生态系统服务产生、传递和使用、需求等的研究可为生态系统服务流量化提供理论基础,有利于生态系统服务流量化的开展;对供给、流和需求的耦合研究有利于生态系统服务的准确量化,生态系统服务流量化是对生态系统服务的动态评估,增加了生态系统服务评估与制图的现实有效性和精确性,为决策者制定合适的生态管理政策和生态补偿等提供有力依据.

1 生态系统服务流量化理论基础

生态系统服务的形成是一个复杂的过程.景观中的生物成分与非生物成分相互作用构成生态系统^[9].生态系统的过程与属性在时空上的维持形成生态系统的基本功能^[10].可以被人类直接或间接使用的生态系统功能形成生态系统服务^[11].生态系统服务从一个地区传递到另一个地区为人类所使用,形成生态系统服务流^[12].一般情况下,生态系统服务由3个基本环节构成,即生态系统服务的供给、流和需求.

1.1 生态系统服务供给

生态系统服务供给指在一定时间范围尺度内,某一特定区域的生态系统通过其本身的生态完整性为人类提供的生态系统服务的数量和质量^[13],具体包括生态系统中的非生物成分(水体、土壤单位)和生物成分(物种多样性、物候、分布和特性属性)能够提供服务的全部集合^[14].生态系统服务供给分为生态系统服务的潜在供给(简称“潜力”)和实际供给,生态系统服务的潜在供给即自然资本存量,是基于自然生态系统的视角能够提供的最大量的产品和服务^[15].实际供给是被人类实际使用的生态系统服

务或产品的量^[16].通常,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.潜在供给与实际供给的区别以及指标的确定在供给服务(如食品、药材和木材等)方面相对容易,而涉及到调节(如空气质量调节和气候调节等)和文化服务(如景观美学等)则存在一定难度.

对生态系统服务供给的量化,提供了生态系统供给状态以及供给的可能性信息^[17],且量化涉及到复杂的生物物理变化和生物化学变化监测,需要大时间尺度分析与观察.一般情况下,生态系统服务的供给潜力具有时空属性.不同地理位置所处的海拔、土壤性质、光照和温度等条件以及土地覆被类型均会影响生态系统服务的供给潜力.不同时间段和尺度所积累的生态系统服务潜在供给量也存在不同,如食品供给服务和空气质量调节服务的供应量会随着植物的生长周期而变化.

1.2 生态系统服务流

1.2.1 生态系统服务流的定义与分类 生态系统服务流作为连接服务供给与需求必不可少的纽带,在对生态系统服务的输送、转化和维持等方面有重要作用.不同学者对生态系统服务流有不同认识^[18-19],且其量化侧重也不同(表1).Fisher等^[20]基于生态系统服务传递的空间关系,将生态系统服务流分为3类:原位服务流、全向服务流和定向服务流.原位服务流指生态系统服务产生区与受益区基本重叠,如土壤形成;全向服务流是生态系统服务从供给区沿各方向传递到使用区,如空气质量调节和碳汇等;定向服务流是生态系统服务从供给区沿某一方向传递到服务使用区,如淡水供给服务与洪水调控等.生态系统服务流还可以根据主体的移动特征分为服务移动流和用户移动流^[12].服务移动流是生态系统服务主动从服务的提供区转移到受益区,

表1 生态系统服务流的定义对比

Table 1 Comparison of ecosystem service (ES) flow definition

文献 Reference	生态系统服务流定义 Ecosystem service flow definition	侧重点 Focus
[18]	生态系统服务供给区与受益区之间的时空连接,是生态系统服务的实际供给	ES的实际供给
[19]	生态系统提供的生态系统服务被受益者实际所使用的量,实际使用的生态系统服务等同于生态系统服务流	ES的最终实现
[20]	在流域或景观生态系统中,由供给区产生的生态系统服务,依靠某种载体或不经过载体运载,在自然或人为因素的驱动作用下沿着一定的方向与路径传递到人类使用区的时空过程	ES的传递载体

用户移动流是受益人直接转移到服务提供区主动获取服务的一种方式,如户外休闲和旅游等。一般情况下,很多类型的生态系统服务流都是这两种方式组合在一起形成的。

1.2.2 生态系统服务流的属性特征 对生态系统服务流物理特征的描述有利于生态系统服务流量化的实现。生态系统服务流具有时空特征、载体特征和量化属性特征^[21]。

生态系统服务流的时空特征是生态系统服务供需异性的具体体现,不同生态系统服务流的时间尺度和空间尺度不同。生态系统服务的空间尺度与时间尺度呈正相关时,空间尺度越大,生态系统服务流实现效益的时间越久^[22],如淡水供给服务,不同区域之间调水需要花费更长时间;此外,部分生态系统服务流的时空关系也存在负相关^[23],如土壤形成服务。对生态系统服务流时间尺度的测定有助于生态系统服务流的进一步研究,且其空间尺度更易于定量。

大部分生态系统服务的跨尺度交付需要依托某些载体(如水、空气和某些动物等)或工具才能够实现^[24]。也有部分生态系统服务流不需要载体,因其本身就是一种服务(如水资源)。载体是作为承载工具还是具体的服务,取决于其本身的性质以及在特定条件下受益者的不同选择。还有一种特殊的生态系统服务流是通过人类主动移动到服务供给区实现的,如景观休憩和休闲服务。

生态系统服务流具有跨区域流动性,有流向、流速和流量 3 种属性特征^[19]。生态系统服务流流向可根据服务流的传递载体、地形地貌,气象条件等因素来判别;生态系统服务流流速可以根据其传递的空间尺度和时间尺度来确定,是生态系统服务流从供给区传递到受益区的空间距离(以千米为单位)与其传递所花费的时间(以小时为单位)的比值;而生态系统服务流流量是生态系统服务从供给区经过传递路径到达受益区的具体服务量,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。

1.3 生态系统服务的需求

学者们对生态系统服务需求的理解和侧重存在不同。Burkhard 等^[25]认为,生态系统服务需求是在特定时间和空间位置对生态系统产品和服务的消费或使用。Villamagna 等^[26]认为,生态系统服务需求是社会需要或人类期望所获的生态系统服务与产品的量。对服务需求的不同理解导致对生态系统服务需求量化所使用的指标与方法存在差异。目前,对于

生态系统服务需求评估建立的大多数指标没有明确区分生态系统服务消费率和人类实际需求。在阅读文献和研究背景的基础上,对于生态系统服务的需求本文侧重第二种解释,即生态系统服务需求不等同于消费,而是人类想获取服务的意愿。生态系统服务需求可以随时间和空间而改变,与实际生态系统服务供应无关,但受生物物理环境、人口规模、文化偏好以及群体感知力等影响^[17]。随着科学技术、先进手段和现代化工具的使用,人类对生态系统服务的消费呈指数式增长^[27],这也在不同程度上满足了一定区域人类对服务的需求,但在不同的时空范围内,人类对某些生态系统服务仍处于过度消费或未满足状态^[28]。

2 生态系统服务流过程与环节的基本关系

2.1 生态系统服务流的空间单元

生态系统服务流的产生非常复杂,是一个多因子相互作用的生物物理过程,并融合了人类需求、调控与管理的综合过程^[29]。生态系统服务流能够连接自然生态系统和人类社会经济系统。大部分生态系统服务从产生到实现的过程需要经过 3 个区域,即供给区、连接区和需求区(图 1)。

生态系统服务供给区^[30](service-providing area, SPA)是进行生态系统服务形成和变化机制研究的基本单元,能够提供产品或服务;包括提供生态系统的非生物成分(水体、土壤单位)和生物成分(物种多样性、物候、分布和特性属性)的全部集合。生态系统服务连接区^[31](service-connecting area, SCA)是服务供给区和使用区具有空间异质性条件下存在的中间区域,生态系统服务流传递过程大部分发生在此区。在某些生态系统服务流的连接单元中,还存在一个特殊区域,这个区域是生态系统服务的滞留区,能够减少服务流流量,也就是“汇”^[32]。如人类在河流上建造大坝用来发电、防洪等,建造水库来储存淡水资源,大坝和水库可以看作与水相关的生态系统服务流的“汇”区域,“汇”不仅通过影响生

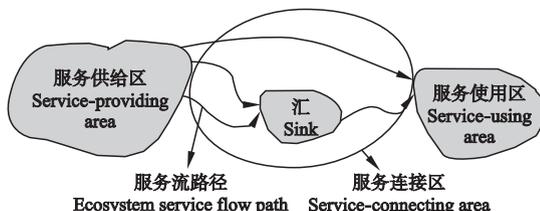


图 1 生态系统服务流的空间关系

Fig.1 Spatial relationship of ecosystem service flow.

态系统服务流的传递效率来影响生态系统服务流流量,滞留的生态系统服务也给服务流量化带来困难.汇的存在增加了生态系统服务流的过程变量,还可以提高部分生态系统服务,例如水库的建造提高了旅游和休闲等文化服务.同种类型的生态系统服务流经不同类型的连接单元,其流量发生很大变化.生态系统服务需求区^[21]也叫使用区(service-using area, SUA)是能够使用或消费生态系统服务的区域,通常指人类社区、居民区等.

供给区的生物多样性因子、连接区的自然地理和生态条件以及需求区人类的社会经济与文化状况等都会影响服务流的产生和有效传递.对生态系统服务流空间单元的明确可为规划者和决策者提供生态系统服务供给、流和需求位点的准确信息,并将其整合在生态管理与决策中.

2.2 生态系统服务供给、流和需求的关系

基于生态系统服务流的空间关系,可以判断出生态系统服务流的传递过程经历了供给潜力、流和需求3个基本环节.生态系统服务供给潜力产生于自然生态系统,不同土地覆被类型、生物多样性、立地条件等的供给潜力也不同.生态系统服务流是生态系统服务的实际供给^[33],也就是人类实际使用的产品或服务.生态系统服务需求是人类对某种生态系统产品与服务的需求意愿,受制于社会经济系统中的各种因素.生态系统服务供给潜力、流和需求之间关系复杂.

供给潜力、流和需求之间的关系,可以通过供给潜力-流、流-需求来两两分析供给潜力产生于自然生态系统,代表生态系统服务库存量,评估过程中会受制于时空尺度.生态系统服务流是人类对生态系统服务的实际获取.潜在供给和流的关系体现在两方面:供给潜力小于流量(服务被过度使用)和供给潜力大于等于流量(适度使用).潜在供给和流是否匹配可以指示生态系统服务是否被可持续利用或不可持续的获取.需求来源于社会经济系统,是人类对服务的偏好或期望,流与需求的关系也体现在两方面:流量大于等于需求(满足)和流量小于需求(未满足).流与需求是否匹配体现了社会需求是否被满足的状态.生态系统服务不可逆的传递,致使生态系统服务供需关系的间接化,生态系统服务需求可以间接驱动生态系统服务的供给和流.对生态系统服务供给潜力、流和需求之间关系的分析^[34](图2),有利于生态系统服务流量化工作的开展.

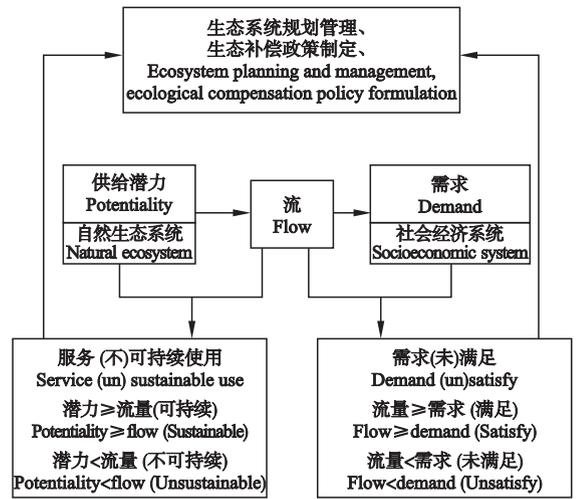


图2 生态系统服务供给潜力、流和需求之间的关系^[34]

Fig.2 Relationship of ecosystem service potentials, flow and demand^[34].

3 生态系统服务流量化的具体过程

生态系统服务流的研究能够在供给区与需求区之间建立时空连接.目前已有学者开始对社会经济系统的生态系统服务流进行量化研究.通过统计数据,针对在开放条件下伴随着产品贸易而出现的大规模生态系统服务流的评估研究^[35].本文基于景观生态学角度,探讨经由自然生态系统产生而在社会经济系统中发挥作用的那部分生态系统服务流.此类生态系统服务流的量化应该是一个全面而逻辑性强的过程,包括基础性工作和核心工作两部分(图3),其具体评估步骤如下:

3.1 选取合适的研究区

在实践中对生态系统服务流的验证是其理论的

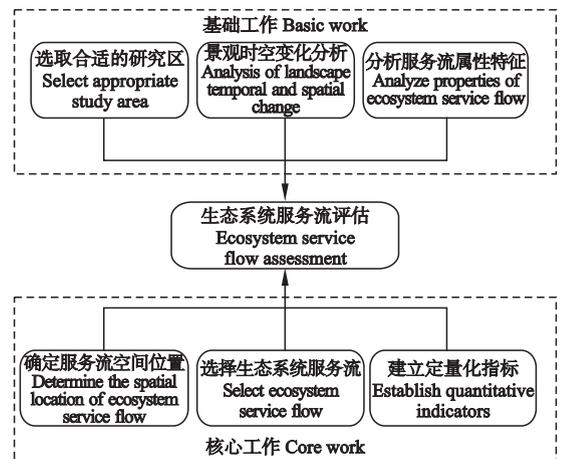


图3 生态系统服务流评估过程

Fig.3 Assessment process of ecosystem service flow.

升华,选取合适的研究区,将服务流研究置于大的景观背景中尤为重要。生态系统服务流研究的是服务的传递和转移,因此空间尺度的大小将直接影响服务流是否可被量化、可视化和价值化。空间尺度选择的太大,服务流的转换节点与需求类型多样、路径情况复杂等问题将会影响服务流属性的分析;大的空间尺度必然会导致生态系统服务的供给区与需求区距离太远,若不在同一行政单元,综合研究所需的统计数据的获取将会受到限制,影响研究进度。而过小空间尺度下生态系统服务流路径不能够完全被展现,造成评估结果片面化。生态系统服务流研究最好选择景观类型丰富、面积适中的完整流域。流域以水为纽带连接上中下游^[36],一般情况下,上游由于靠近河源会被作为区域的水源地而受到很好的保护,因此生态环境较好,是主要的生态系统服务供给区;下游地区一般地势平坦、交通便利,是主要的居民聚居区,也是生态系统服务的主要需求和消费区域;中游作为上下游的过渡区,也是主要的生态系统服务传递区域。因此,典型的小流域是研究生态系统服务流的最佳区域。

3.2 分析景观时空变化

生态系统服务来源于生态系统结构和功能的完整性,研究区景观格局的时空变化影响生态系统服务供给,区域的坡形、坡向、地势的起伏和景观类型等均会影响服务流的传递过程、区域农村和城镇的面积、分布和格局,也会影响需求区对服务流的接收。可利用不同时段的土地利用数据,选取合适的景观格局指数,如集合度指数、最大斑块面积指数等,通过 ArcGIS 中的空间分析模块和 Fragstates 软件来实现研究区景观格局的时空变化分析。

3.3 选择研究对象

不同景观产生的生态系统服务种类、数量和质量不同,不同时空尺度下基于人类需求的生态系统服务也不同。在全面分析研究区景观面积与格局时空变化的基础上,根据研究区的实际状况和人类的实际需求,识别研究区景观能够提供的主要生态系统服务的种类。从对区域人类福祉相关性较大的生态系统服务中选择具有动态流动性质的服务,如洪水调控服务、淡水供给服务、旅游文化服务等来开展研究。在流域中,水作为主要的生态系统服务主体和传递媒介是开展生态系统服务流研究的最佳对象。水的流动性明显有利于追踪与水相关的生态系统服务的路径;区域水文站对水量和水质参数的统计监测有利于相关数据的获取;对于与水相关的生态系

统服务的统一研究便于实地试验和问卷调查的综合开展。

3.4 分析服务流属性特征

生态系统服务流属性的确定是评估和量化生态系统服务流必不可少的过程,是该研究的前提。分析服务流属性需要明确以下几个问题:类型问题,服务流是供给服务流、调节服务流还是文化服务流;流向问题,生态系统服务流流向是单向线性、全方向弥散性还是原位不动(一般此类服务流不在研究中);载体问题,生态系统服务流在传递过程中是否需要载体,载体是生物因子还是非生物因子,载体是作为一种承载工具来协助服务的传送,还是其本身也可以直接作为一种服务来发挥作用;竞争问题,服务流传递到需求区的过程中,各需求区对服务流的使用是竞争性的(影响其他用户对服务流的使用)还是非竞争性的(用户之间不产生权衡)。对生态系统服务流属性的深入分析有利于研究的进一步开展。

3.5 确定服务流空间位置

识别生态系统服务的供给区、需求区和连接区是服务流研究的基础工作。生态系统服务流供给区的空间位置相对容易确定,但不同生态系统类型产生的生态系统服务流会有所侧重,故在研究过程当中确定某种生态系统服务流的供给热点区对服务流的针对研究、分区管理等有重要作用。对生态系统服务连接区的确定根据服务流属性的不同难度也不同。以土为媒介的服务流由于时间尺度过大、空间尺度小而较难度量,以气为媒介的服务流由于空气流动的方向性不明确也难以确定,通常与水相关的服务流连接单元集中在河渠或湖泊等地,相对容易确定。生态系统服务的需求单元以人类为主体,受社会和经济系统复杂性的影响,确定时需要考虑多种因素。表 2 基于生态系统的土地覆被和土地利用类型,总结了调节服务、供给服务和支持服务中共 10 种类型的供给区和需求区的空间位置^[7]。

因此,分析清楚生态系统服务流的传递路径,采用 3S 技术和野外考察相结合的方式把握传递路径周边的环境特征,有利于生态系统服务流的准确定量。

3.6 建立测度指标

生态系统服务流的形成是在自然和人为因子的驱动作用下,从自然生态系统进入到人类社会系统的,生态系统服务流的量化区别于简单的生态系统服务潜在供给的评估,只有搞清楚所研究的某种服务流的潜在供给、实际供给和需求,才能够根据具体

表 2 生态系统服务流供给区和需求区位置^[7]Table 2 Localization of ecosystem service flow definition (SPA and SUA)^[7]

生态服务类型 Species of ES	服务供给区位置 Location of SPA	服务需求区位置 Location of SUA	
调节服务 Regulating service	局地气候调节 Local climate regulation	森林、湿地、湖泊、海洋、(城市)绿地	住宅和休闲区
	空气质量调节 Air quality regulation	树林、树篱、绿地	住宅和休闲区
	水质净化 Water purification	水体、水生植物群、河岸带、过滤土壤、森林、湿地、草原	住宅或休闲区、农业、工业
	侵蚀调节 Erosion regulation	森林、树篱、农林牧过渡带、牧场、草原	居住区、农业领域、基础设施
	授粉调节 Pollination regulation	花园、果园、森林、湿地、农业区	农业、花园、野生植物区、水果种植园、农民
供给服务 Provisioning service	粮食 Crops	农业、野生植物区、农民、果园	农场、食品厂、社区、家庭
	木材 Timber	森林、造林区、果园、农林业	林务员、锯木厂、木工业、建设、社区、家庭
文化服务 Cultural service	淡水 Freshwater	水库、水体河流、冰川、地下水	供水公司、农业、工业、社区、家庭
	休闲与旅游 Recreation and tourism	森林、水体、山峰、城市绿地、花园、海滩、休闲设施区	旅游基础设施、访客、社区、居住区
	景观美学 Landscape aesthetic	景观、海景、水体、河流、森林	旅游基础设施、贸易商、行业、访客、社区、居住区

SPA: Service-providing area; SUA: service-using area.

情况评估生态系统服务流的流量。简单的生态系统服务流评估有时不能够直观地表现服务流对区域的作用,需要构建其他的测度指标来丰富研究。

迄今为止,有学者已经开始尝试对生态系统服务流进行定量化研究。如 Serna-Chavez 等^[16] 构建了 Ben.flow% 指标评估研究区依靠生态系统服务流获得惠益的面积占总受益面积的比例,来衡量服务流对受益区的重要程度。2012 年, Burkhard 等^[25] 根据土地覆被类型构建生态系统服务的潜力和需求评估矩阵,基于 44 种土地利用类型可以提供的生态系统服务供给和需求的强度,评估了包括供给服务、调解

服务和文化服务在内的共 29 种服务。将每种土地覆被类型与服务供给和需求对应起来,根据其提供服务的能力分成 0~5 (从无相关能力到极高相关能力) 6 个等级;之后将生态系统服务的供需偶合起来,制作了生态系统服务供需平衡关系矩阵,最终提出的土地覆被类型与生态系统服务供给、需求能力相关强度矩阵没有将生态系统服务的供给潜力和流区分出来。2014 年, Burkhard 等^[7] 发布的新版本矩阵加入了生态系统服务流的评估,并将生态系统服务供给潜力与流、流与需求耦合起来,制作了潜力-流比较矩阵和流-需求比较矩阵。多元化的矩阵评估指

表 3 生态系统服务供给潜力、流和需求指标^[7]Table 3 Indicator of ecosystem service potentials, flow and demand^[7]

生态服务类型 Species of ecosystem service	供给潜力指标 Service potential indicator	流指标 Service flow indicator	需求指标 Demand indicator	
调节服务 Regulating service	局地气候调节 Local climate regulation	温度、反照率、沉淀、风、蒸散量、阴影面积	过热或暴雨性能或周期、空调使用	
	空气质量调节 Air quality regulation	植被吸收或滞留空气污染物(二氧化碳、粉尘等)的潜力、叶面积指数	去除的气溶胶或污染物、空气质量标准幅度	
	水质净化 Water purification	水质指标、沉积物负荷、总溶解固体	从水中去除的元素、水质标准幅度	水中污染物水平、水质标准偏差
供给服务 Provisioning service	侵蚀调节 Erosion regulation	潜在的土壤流失率;植被覆盖、土壤颗粒损失	保留的土壤或沉积物的量、防止侵蚀事件次数	侵蚀事件次数、侵蚀造成的土壤流失
	授粉调节 Pollination regulation	传粉者的种群数量、传粉者的潜在栖息地	实际受益于授粉的植物数量或范围	需要授粉的农作物或花卉数量或范围
	粮食 Crops	常规库存/或净初级生产	收获作物、产量	作物产品消费
文化服务 Cultural service	木材 Timber	常规库存/或净初级生产	收获木材、产量	木材使用
	淡水 Freshwater	总水量、地下水补给率	取水量	用水量
景观美学 Landscape aesthetic	休闲与旅游 Recreation and tourism	设施数量(如酒店、餐厅、徒步旅行路径、停车场)、调查问卷的评价	实际的游客数量、实际营业额	个人计划或旅游期望
	景观美学 Landscape aesthetic	调查问卷的评价、景观矩阵度量	景点的数量、旅行的费用、支付意愿	个人偏好或期望

标为生态系统服务流量化提供了有力工具.这类方法可用于数据缺失区域的生态系统服务流评估.在数据相对容易获取的单元或者区域, Burkhard 等^[7]构建了生态系统服务供给、流和需求的评估指标体系(表 3).

生态系统服务流指标体系的确立极大促进了生态系统服务流的量化的实现,为区域生态系统管理奠定坚实基础.

4 结 语

3S 技术、计算机模型与生态系统服务及其流的相关理论知识的结合是生态系统服务流量化与模拟的深化.服务路径属性网络(SPANS)模型^[37]的开发不仅能够评估和模拟某项具体的生态系统服务流,还可以通过空间直观方法显示生态系统服务流的路径和流量.对生态系统服务流传递过程的明晰能够有效辅助决策者制定积极的生态补偿与恢复政策.人类活动这一不可控因素的加入造成了研究的困难,但相关学科新的研究成果的积累定会解决在生态系统服务流研究过程中呈现出来的各种问题.

在生态系统服务流量化过程当中,仍有一些问题尚待深入研究:1) 机制问题.生物多样性水平上生态系统服务的形成机制、生态系统服务流的自然和人文驱动机制以及生态系统服务流的时空传递机制等的不明确,制约了生态系统服务流理论的基础研究.学者们在对生态系统服务流评估及模拟的过程中,要注意分析不同属性的生态系统服务流及其路径传递网络中参数的细微变化,以此来揭示生态系统服务流的传递密码,准确量化和评估生态系统服务.2) 尺度问题.对于生态系统服务的评估要根据空间单元的时空距离来确定.不同时空尺度生态系统服务从供给区到需求区交付的服务数量和质量都不相同.生态系统服务流的最佳研究尺度是中小尺度,无论是人为驱动还是非生物因子的传递作用下,对生态系统服务流的评估均存在时空尺度的变化问题.不同类型的生态系统服务流的传递时间和距离差异甚大,即使同种类型的生态系统服务流受不同因素的影响其传递的时空尺度也会不同,因此有必要开展生态系统服务流的多尺度处理和尺度推绎工具的研究.3) 预测问题.对生态系统服务的预测是生态管理和制定生态补偿政策的关键环节,但目前的评估与模拟及其相关研究方法等在生态系统服务预测方面存在不足.今后,应将研究区地理特征与人文特征相结合,融合多学科理论和方法,利用多元化的

制图技术,构建具有动态性和综合性的生态系统服务流量化及其模拟制图研究平台.

参考文献

- [1] Costanza R, De Groot, Farber S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, **25**: 3-15
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. Washington, DC: World Resources Institute, 2005
- [3] Zang Z (臧 正), Zou X-Q (邹欣庆). Connotation characterization and evaluation of ecological well-being based on ecosystem service theory. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2016, **27**(4): 1085-1094 (in Chinese)
- [4] Burkhard B, Crossman N, Nedkov S, et al. Mapping and modelling ecosystem services for science, policy and practice. *Ecosystem Services*, 2013, **4**: 1-3
- [5] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005
- [6] García-Nieto AP, García-Llorente M, Iniesta-Arandia I, et al. Mapping forest ecosystem services: From providing units to beneficiaries. *Ecosystem Services*, 2013, **4**: 126-138
- [7] 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
- [8] Yang L (杨 莉), Zhen L (甄 霖), Pan Y (潘影), et al. Ecosystem services supply and consumption: A case in Yellow River watershed, China. *Journal of Arid Land Resources and Environment (干旱区资源与环境)*, 2012, **26**(3): 131-138 (in Chinese)
- [9] Xiao Y (肖 玉), Xie G-D (谢高地), An K, et al. Connotation characterization and evaluation of ecological well-being based on ecosystem service theory. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2012, **36**(4): 353-362 (in Chinese)
- [10] Hillebrand H, Matthiessen B. Biodiversity in a complex world: Consolidation and progress in functional biodiversity research. *Ecology Letters*, 2009, **12**: 1405-1419
- [11] Feng J-F (冯剑丰), Li Y (李 宇), Zhu L (朱琳). Discrimination of concepts of ecosystem functions and ecosystem services. *Ecology and Environmental Sciences (生态环境学报)*, 2009, **18**(4): 1599-1603 (in Chinese)
- [12] Li S-C (李双成). Geograph of Ecosystem Service. Beijing: Science Press, 2014 (in Chinese)
- [13] Xie G-D (谢高地), Zhen L (甄 琳), Lu C-X (鲁春霞), et al. Supply consumption and valuation of ecosystem services in China. *Resources Science (资源科学)*, 2008, **30**(1): 93-99 (in Chinese)
- [14] Syrbe RU, Walz U. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: Providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics. *Ecological Indica-*

- tors, 2012, **21**: 80–88
- [15] Baró F, Palomo I, Zulian G, *et al.* 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
- [16] Serna-Chavez HM, Schulp CJE, Van Bodegom PM, *et al.* A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, **39**: 24–33
- [17] Zhao Q-J (赵庆建), Wen Z-M (温作民), Zhang M-X (张敏新). Identifying forest ecosystem services supplies and demands: Insights from ecosystem services flows. *Forestry Economics* (林业经济), 2014(10): 3–7 (in Chinese)
- [18] 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
- [19] Liu H-M (刘慧敏), Fan Y-L (范玉龙), Ding S-Y (丁圣彦). Research progress of ecosystem services flow. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(7): 2161–2171 (in Chinese)
- [20] Fisher B, Turner RK, Morling P. Defining and classifying ecosystem systems service for decision making. *Ecological Economics*, 2009, **68**: 643–653
- [21] Liu H-M (刘慧敏), Liu L-Y (刘绿怡), Ding S-Y (丁圣彦). The impact of human activities on ecosystem services flow. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37**(10): 1–10 (in Chinese)
- [22] Yang L (杨莉), Zhen L (甄霖), Pan Y (潘影), *et al.* Ecosystem services supply and consumption: A case in Yellow River watershed, China. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2012, **26**(3): 131–138 (in Chinese)
- [23] Yang J-L (杨金玲), Zhang G-L (张甘霖), Huang L-M (黄来明), *et al.* Rock weathering and soil formation rates of a forested watershed in the typical subtropical granite area. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2013, **50**(2): 253–259 (in Chinese)
- [24] Johnson GW, Bagstad KJ, Snapp RR, *et al.* Service path attribution networks (SPANs): A network flow approach to ecosystem service assessment. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 2012, **3**: 54–71
- [25] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, *et al.* Mapping supply, demand and budgets of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2012, **21**: 17–29
- [26] Villamagna AM, Angermeier PL, Bennett EM. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecology Complexity*, 2013, **15**: 114–121
- [27] Wang D-S (王大尚), Zheng H (郑华), Ouyang Z-Y (欧阳志云), *et al.* Ecosystem services supply and consumption and their relationships with human well-being. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(6): 1747–1753 (in Chinese)
- [28] Zhen L (甄霖), Liu X-L (刘雪林), Li F (李芬), *et al.* Consumption of ecosystem services and eco-compensation mechanism in ecological sensitive regions: Progress and challenges. *Resources Science* (资源科学), 2010, **32**(5): 797–803 (in Chinese)
- [29] Luck GW, Harrington R, Harrison PA, *et al.* Quantifying the contribution of organisms to the provision of ecosystem services. *BioScience*, 2016, **59**: 223–235
- [30] Luck GW, Daily GC, Ehrlich PR. Population diversity and ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, **18**: 331–336
- [31] Syrbe RU, Walz U. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: Providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics. *Ecological Indicators*, 2012, **21**: 80–88
- [32] Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), Zhao W-W (赵文武). Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(5): 1444–1449 (in Chinese)
- [33] Lukas EV, Daniel D, Paulo 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
- [34] Baró F, Palomo I, Zulian G, *et al.* 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
- [35] Xu X-Y (徐晓勇). A Study on the Spatial Flow and Its Impact of China's Ecological Service under the Open Economy. PhD Thesis. Kunming: Yunnan University, 2016 (in Chinese)
- [36] Zhang Z-Q (张志强), Cheng L (程莉), Shang H-Y (尚海洋), *et al.* Review and trend of eco-compensation mechanism on river basin. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(20): 6543–6552 (in Chinese)
- [37] Bagstad KJ, Johnson GW, Voigt B, *et al.* Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, **4**: 117–125

作者简介 刘慧敏,女,1989年生,博士.主要从事景观生态学研究. E-mail: liuhuimingirl@126.com

责任编辑 杨弘