

DOI: 10.5846/stxb201411172274

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): - .

Xiao Y, Xie G D, Lu C X, Xu J. Involvement of ecosystem service flows in human wellbeing based on the relationship between supply and demand. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): - .

基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展

肖 玉^{1,*}, 谢高地¹, 鲁春霞¹, 徐 洁^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 生态系统服务研究越来越强调服务与人类福利的关系。生态系统服务空间流动研究试图在生态系统服务供给与使用之间构建因果联系, 探索服务供给时空动态与人类福利变化的关系。综述了 20 世纪 90 年代以来国内外生态系统服务研究的进展, 梳理了生态系统服务空间流动研究发展的脉络及其出现的必要性, 提出了未来生态系统服务空间流动发展的重要方向是分布式空间模拟, 但这受到数据可获得性和专业知识的限制。未来可以通过利用已有地理资源数据库和派生数据库增加数据来源, 组建由不同学科人员组成的研究团队来弥补专业知识不足造成的影响。通过生态系统服务空间流动研究, 可以在生态系统服务供给和需求之间建立反馈关系, 为制定科学合理的管理政策提供科学依据。

关键词: 生态系统服务; 空间流动; 空间特征; 模型模拟

Involvement of ecosystem service flows in human wellbeing based on the relationship between supply and demand

XIAO Yu^{1,*}, XIE Gaodi¹, LU Chunxia¹, XU Jie^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

Abstract: Recent ecosystem service flow studies have highlighted the relationship between services and human wellbeing. Ecologists have tried to establish a causal connection between service supply and use, and have attempted to explore the relationship between the temporal and spatial dynamics of service supply and change to human wellbeing. In this report, we review previous studies on ecosystem service flows since the 1990s and investigate the progress that has occurred and its importance. The initial studies focused on the mechanism behind ecosystem service flows and assessed its economic impact, which established a solid basis for further research. The progressively better understanding of the spatial characteristics of ecosystem service supply and use encouraged more researchers to get involved in this study field using simulation modeling, and to investigate supply and use balance at different spatial scales. Analysis of the spatial relationship between service supply areas and use areas identified the existence of a wide spatial mismatch in many types of ecosystem service areas. Therefore, it is necessary to investigate ecosystem service flows in order to understand the process driving the transformation of service production areas into use areas and to clearly define the spatial extent of service providers and beneficiaries. Although several studies on ecosystem service flows have been conducted, information on the distributed simulation of future conditions is limited due to a lack of systematic data and specialized professional knowledge. The data shortage issue can be resolved by using existing databases and derivative databases on geography, ecology, and natural resources. The gap in

基金项目: 国家科技支撑课题 (2013BAC03B05); 国家自然科学基金项目 (31400411)

收稿日期: 2014-11-17; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoy@igsnrr.ac.cn

specialized professional knowledge can be bridged if professionals from different disciplines, such as hydrology, geography, ecology, meteorology, and computer science, join forces. The study of ecosystem service flows will help develop the feedback relationships between ecosystem service supply and demand and will underpin scientific knowledge of ecosystem management.

Key Words: ecosystem services; spatial flow; spatial characteristics; simulation modeling; review

从 20 世纪 90 年代以来,生态系统服务研究开始成为生态学、生态经济学等领域关注的热点。随着对生态系统服务认识的深入,研究者有关生态系统服务研究的关注点不断演进。最初的研究强调从生态学角度认识生态系统服务,认为生态系统服务是维持人类生存的生态系统环境条件和过程^[1]。随着联合国千年生态系统服务评估的开展,生态系统服务开始受到包括学术界、政府、非政府组织等在内的广泛关注,研究者开始认识到生态系统服务与人类福利之间的关系,将生态系统服务定义为人类从生态系统中获得的惠益^[2-3]。近年来,生态系统服务的研究中越来越强调人类福利的重要性,认为生态系统服务是“直接享用、消耗和使用以产生人类福利的自然构成”^[4]。生态系统服务研究中越来越关注人类需求,离开人类受益者,生态系统的结构和过程无法形成生态系统服务^[5-6]。因此,Burkhard 等^[7]认为生态系统服务是“生态系统结构和功能结合其他输入对人类福利的贡献”。可见,人类福利在生态系统服务的研究中受到越来越多的重视。那么,如何在生态系统服务的研究中体现生态系统服务对人类福利的影响呢?已有的研究大多通过研究某项生态系统服务的增减来描述其对人类福利的影响^[2,8-9]。这些研究中的人类福利大多是空泛的,受益者没有具体空间位置,也不能确定哪些人群受益。最近,开始有研究者关注生态系统服务的供给与需求及其平衡状况,以某个区域内人们对生态系统服务的需求是否得到满足来研究服务对人类福利的影响^[10-11]。但是,这些研究可能存在生态系统服务的供给和需求空间不匹配的问题^[12-13],即该区域提供的生态系统服务并不用于满足同一个区域内人类社会的需求。因此,需要对生态系统服务从产生、流动到使用的全过程进行研究,理清生态系统服务从供给到达需求的流动过程,才能明确生态系统服务变化究竟对人类福利产生了什么样的影响。在此基础上,才能在生态系统服务的供给与需求之间建立因果关系,反映受益者对服务供给的增加或减少做出的直接响应和反馈。

1 生态系统服务供给研究是生态系统服务空间流动研究的基础

1.1 从生态学角度研究生态系统服务形成及其变化机制

20 世纪 90 年代以来的很多生态系统服务研究都是从生态学角度出发,更多关注生态系统结构、过程和功能方面^[14-15]。生态系统服务的产生本身是基于生态系统过程(如养分循环、初级生产、分解作用等)、属性(生态系统稳定性、恢复力、物理结构等)以及这些过程和属性在时间和空间上的维持^[16-18]。一些研究者通过野外实验来探讨生态系统服务与生物多样性以及植物功能性状之间的关系,并分析其中存在的内在机制^[19-21],这有助于探索生态系统服务产生与形成的过程及其机制。更多的研究者通过田间试验和模型模拟获取生态系统服务动态^[22-26],将生态系统服务的变化与相关的基础生态学过程联系,试图将这些生态系统服务研究成果应用于生态系统服务管理,但目前并没有明显进展。因为这些研究没有考虑人类需求,或者假设人类社会有对这些生态系统结构、过程和功能产生的生态系统服务有需求。这些研究只是从生态学的角度研究了生态系统服务的供给及其形成和变化的机制,还缺乏有关人类对该项生态系统服务需求的具体研究。

1.2 从经济学角度评价生态系统服务供给及其重要性

与此同时,这一时期还有很多从生态经济学角度开展的生态系统服务经济价值的评价研究。这些研究估算出某个区域、某个物种或某个过程的生态系统服务价值^[2,8-9]。影响范围最广的是 Costanza 等^[2]在“自然”杂志上发表的论文,其评价结果显示全球生态系统服务经济价值为 33 万亿美元,远远超过了当年全球经济总

量,使得围绕该结果产生了大量争论^[27-28]。后来,国内外众多的学者评价了不同区域和不同类型生态系统提供的生态系统服务价值^[29-33],这为了解全球、国家以及区域尺度的生态系统服务价值空间格局和时间变化提供重要的数据基础。但是,这些结果主要是从生态经济学角度评价了生态系统结构、过程和功能对人类福利的贡献,考虑了人类的需求,但是这些人类需求是宽泛的和不确定性的,难以在生态系统管理过程中提供有实用价值的科学结论。

2 生态系统服务供给的空间特征研究是服务流动研究的萌芽

生态系统服务的供给是指特定区域在特定时间段内提供特定生态系统产品和服务的能力^[34]。生态系统服务供给单元是生态系统服务产生的空间单元^[6],由生态系统、种群及其物理组成构成^[35]。生态系统服务供给单元具有明显的空间异质性,所以其服务供给能力也具有显著的空间特征。

由于大部分生态系统服务可以在空间上进行模拟和绘图,使得生态系统服务供给空间特征研究成为可能^[36-37];粮食生产可以通过将农业过程模型与土地利用、土壤和气候参数结合起来模拟^[38];水供给可以通过流域尺度水平衡公式来模拟,将降雨、实际和潜在蒸散、土地覆被和土壤持水能力与基于过程的水文模型相联系,用来模拟日径流,并通过长期日降雨和河流监测数据来校准^[39];通过有关多年生植被覆盖和土壤类型的方程来模拟洪水调节^[40];水流调节通常利用水文模型与土壤、植被、土地利用和土地覆被、地形和降雨作为主要数据输入来模拟^[41];侵蚀防护利用土地覆被、地形和土壤可蚀性参数通过通用土壤流失方程来模拟^[42]。

随着生态系统服务供给模拟和绘图研究的发展,逐渐出现了一些生态系统服务供给模拟工具。目前使用最广泛的是美国斯坦福大学的 Natural Capital 项目开发 InVEST^[43]。它包括用于生物多样性、美学、碳、海岸保护、水产出、沉积物控制等 10 多项生态系统服务的独立模型,结合用来分析生态系统服务的空间格局或者跟踪土地覆被变化导致的改变。InVEST 的模型包括基于代理(Tier 1)的绘图模型、简单自然产出公式(Tier 2)以及基于点的过程模型(Tier 3)。InVEST 的主要输入是土地覆被数据和其他相关的环境参数,产出是以生物量和经济价值形式的生态系统服务估计。基础数据是 InVEST 模型广泛使用的最大障碍,获得需要的空间数据以及对数据进行参数化比较花费时间并且存在出错的风险。同时,目前 InVEST 模型没有不确定分析,Kareiva 等^[43]建议使用相关的生态数据对模型进行参数化,产生模型结果的取值范围并对其不确定性进行度量。因此,未来 InVEST 模型还需要不断改进以更加准确的模拟和绘制生态系统服务供给。另外还有 SoIves,是一个用于评价、绘图和定量认知的生态系统社会价值的 GIS 工具,如美学、生物多样性和娱乐^[44]。

生态系统服务供给模拟有助于了解生态系统服务供给的空间格局,分析不同生物和环境因素对生态系统服务供给的影响,同时可以利用情景分析的方法研究不同管理措施下生态系统服务供给的变化,为区域生态系统管理提供科学依据。然而,仅针对生态系统服务供给方面的研究没有考虑人类对生态系统服务的需求,没有将服务供给与需求关联起来,难以提出科学有效的管理政策措施。

3 生态系统服务供给与需求的关联研究促进了生态系统服务流动研究发展

3.1 生态系统服务供给与需求之间的空间关联

Costanza^[45]基于服务供给与享用的空间特征提出了一个新的生态系统服务分类方法:(1)全球范围-非临近的服务,即人类享用该服务不依赖于与该服务的接近程度,如气候调节(碳沉积和碳蓄积);(2)局部范围临近的服务,即人类享用该服务依赖于与该服务的接近程度,如暴风雨防护;(3)与直接流动相关的服务,即从生产点流动到使用点,如水供给;(4)原位的服务,即服务产生和享用在同一点,如原材料生产;(5)与使用者运动相关的服务,即人们朝着某个独特自然特征的运动,如文化/美学价值。这表明生态系统服务产生及其受益者都与特定的空间位置相联系。Burkhard 等^[34]认为生态系统服务的研究需要从生态系统服务的供给和需求及其相关联系来开展研究。Syrbe 和 Walz^[35]提出了服务连接区域(Service Connecting Areas),是连接生态系统服务供给单元和使用单元的区域,也是生态系统服务供给和使用相互作用空间,并认为服务连接区域

研究面临的问题是服务的传输和变换过程。例如,喀斯特地形区域(服务供给单元)过滤的水,通过长距离地下输送(服务连接区域),作为饮用水提供给城市(服务使用单元)居民使用。可见,将生态系统服务供给与需求联系起来的核⼼问题是弄清楚服务连接区域内服务的传输与变化过程,或者可以称作生态系统服务的流动^[46]。Fisher 等^[6]在 Costanza^[45]的研究基础上将服务产生和效益实现空间关系分为:(1)原位——服务供给和效益实现在同样位置;(2)全方向——服务在一个位置提供,但是惠及周边景观而没有方向偏好;(3)方向性——服务供给惠及服务流动方向的特定位置。因此,理解服务产生及其效益实现之间的空间关系是研究生态系统服务空间流动的基础。

3.2 基于空间特征的生态系统服务供给与需求及其平衡状况分析

生态系统服务供给与需求的空间关联研究始于生态系统服务供给与需求空间特征及其平衡状况研究^[10]。Kroll 等^[11]在德国东部的农村-城市梯度上利用土地利用、土壤、气候以及人口、能源消耗、粮食生产等数据评价了能源、食物和水供给服务的供给与需求,并分析其空间分布格局变化。Burkhard 等^[34]构建了一个生态系统服务供给和需求与景观单元的联系矩阵,利用来自遥感、土地调查和土地覆被以及社会经济数据来评价能源的供给和需求,分析了生态系统服务供给和需求及其平衡状况的空间格局。杨莉等^[47]基于县级统计数据和土地利用数据,分析了黄河流域生态系统粮食、油料和肉类三类食物生产服务的供给与消费,分析了食物生产服务供给与消费的平衡状况,利用县域空间数据将食物生产服务的供给与消费及其平衡状况进行可视化。

这些研究中有关供给的研究是确切的,因为有确切的生态系统及其空间分布特征,能较为准确地计算出其生态系统服务的供给及分布格局,有关人类需求的估算及其空间分布特征的分析可能也是准确的,因为能够利用社会经济统计数据、调查数据和土地利用数据将需求在空间上显示出来,但是生态系统服务的供给与需求之间可能空间上是错位的^[13]。也就是说,人类利用生态系统服务的位置和产生生态系统服务的生态系统地点之间不匹配^[12]。因为没有对其生态系统服务从供给到使用的空间流动过程进行分析,这些研究中的服务供给单元产生的生态系统服务可能并不用于满足该区域服务使用单元的人类需求,特别针对一些需要通过流动来实现的服务,如水供给、侵蚀控制等。这种生态系统服务供给与需求之间空间不匹配可能是由于人为原因造成(如修建输水管道,将水资源输送到外地,而不是留给下游使用),有些是因为自然原因(如洪水不可能从低海拔向高海拔流动)。这样导致生态系统服务供给单元与服务使用单元之间可能没有直接因果联系,研究得出的结论也难以作为制定科学的管理政策提供依据。

3.3 生态系统服务流动研究的发展

生态系统服务流动研究实质上就是要在服务供给与需求之间建立时空关联,明确生态系统服务所产生的效益在什么时间和地点被享用,为生态系统服务付费等政策措施的制定提供信息^[48]。但是,现有的生态系统服务流动的研究大多还停留在概念阶段。

Maass 等^[49]评价了由墨西哥太平洋海岸的 Chamela 地区的热带干旱森林生态系统提供的淡水供给、气候调节、洪水控制等 9 项生态系统供给的服务,并画出了生态系统服务从供给区域向受益区域输送的示意图。Palomo 等^[50]利用参与式调查法分析了西班牙西南部沿海的国家公园的生态供给、调节和文化服务的供给区域和受益区域,并根据服务供给和受益区域的空间位置绘制服务空间流动的概念模型。另外,还有一些研究涉及有关大宗商品贸易的生态系统产品空间流动,如木材和农产品等^[51]。Turner 等^[52]研究了陆地生境保护区为人们提供的生态系统服务的流动,分析了生态服务价值的实现过程,建立了空间流动模型来估计能获得生态系统服务效益的人口数量,在生态服务供给与受益区建立空间关联。Serna-Chavez 等^[48]构建了生态系统服务流动的框架来分析服务供给与受益区之间的空间关联,提出通过生态系统服务流动支持的受益区面积占总受益区面积比例指标来衡量来自生态系统服务的空间流动效益的重要性,并利用该框架及指标对授粉服务、水供给和气候调节服务空间流动做了分析。这些研究已经认识到生态系统服务从服务供给单元到服务使用单元需要经历一个空间流动的过程,同时有的研究可以量化出受益区获得的生态系统服务有多少来自服务

的空间流动,但是并没有给出生态系统服务空间流动的确切路径并模拟其空间流动过程。

美国佛蒙特大学在美国自然基金的资助下开展生态系统服务人工智能(Artificial Intelligence for Ecosystem Services, ARIES)项目研究,提出了“服务路径属性网络”(Service Path Attribution Networks, SPANs)模型^[53]。该模型集成各类生态学和地理学常用的模拟模型,利用概率贝叶斯网络来分析生态系统服务从供给点到使用 and 受益点的流动。ARIES 项目组期望这些模型可以模拟生态系统服务在理想、可能、实际、难以获得和封闭条件下的供给、使用、损耗和流动过程并绘制地图^[54]。目前,ARIES 网站列出其已经开发了包括碳汇和碳蓄积、洪水调节、海岸洪水调节、美学景观、淡水供给、沉积物调节等 8 项生态系统服务模拟模块,并将这些模块应用于不同区域生态系统服务流动模拟。ARIES 的设想非常宏大,需要大量的数据和学科知识来支撑,阻碍了其应用。根据其列出的文献,目前研究更多是在空间上绘制出生态系统服务供给和使用^[54-56],但利用 SPANs 模型来模拟某项具体的生态系统服务空间流动,并通过空间直观方法显示生态系统服务空间流动路径和流量的研究还几乎没有。因此,生态系统服务流动的模拟研究还有很长一段路要走。

4 总结和展望

生态系统服务研究以人为中心,生态系统服务产生、使用和损耗都与人类社会和人类福利有着密切的关系。从 20 世纪 90 年代以来,生态系统服务研究经过近 20 年的快速发展。最初主要关注生态系统服务形成和变化的生态学机制以及经济价值的评估,逐渐发展到关注生态系统服务与人类福利的关系,这两方面的研究虽然存在一些争议(如,同一项生态服务的价值评估方法存在差别,价值评估结果的可信度等),但目前已经取得较多研究成果,为后面的研究提供了重要基础。随后,研究者开始探究生态系统提供的生态服务与人类福利之间的空间关系,研究生态系统服务从供给区流动到使用区的实现过程,试图在生态系统服务的供给与使用之间构建一个因果联系。这方面的研究难度较大,目前研究成果还较少,并没有突破性进展。不过,即便如此也有很多研究者开始投入生态系统服务空间流动的研究,期望通过这些研究在生态系统服务与人类福利之间建立反馈关系,获得能指导实践的科学结论。

今后一段时间内,结合地理要素空间分布特征的分布式模拟仍是研究生态系统服务空间流动的重要发展方向。SPANs 模型就是试图通过分布式空间模拟来分析生态系统服务空间流动过程与路径,虽然现在还没有突破性进展,这仍将是未来生态系统服务空间流动研究发展重要方向。这类方法充分考虑地形地貌、植被、土壤、土地利用等地理要素的空间异质性,模拟生态系统服务空间流动的真实状态,能明确生态系统服务从供给区到受益区的传输过程,确定生态系统服务供给和享用的利益相关者,为制定科学合理的生态补偿和生态付费等政策管理措施提供科学依据。生态系统服务空间流动分布式模拟研究发展受到数据获得性和专业知识的限制,而且适用于中小尺度(如流域),在大尺度(如国家或全球)难以应用。要克服数据缺乏的限制,一方面是直接利用已有的各类数据库,包括地理、生态、自然资源方面的矢量和遥感数据,另一方面也要利用从已有数据中派生出的新数据,如利用遥感数据计算的植被指数、NPP 等数据。要克服专业知识缺乏的限制需要在生态系统服务流动空间模拟工作中组建由来自不同学科人员构成的研究团队,如水文学、地理学、生态学、气象学、计算机学等学科,通过学科交叉互补,综合各类专业知识实现生态系统服务的空间流动模拟。尽管存在很大困难,生态系统服务从供给单元到使用单元的空间流动过程仍然需要研究,因为只有这样才能准确的确定生态系统服务的供给区域和使用区域,确定服务供给和使用的利益相关者,在生态系统服务的供给和使用之间建立一个反馈,将服务的供给与需求有机联系起来,为制定科学合理的管理政策提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, USA: Island Press, 1997.
- [2] 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.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Washington DC.: Island Press, 2005.

- [4] Boyd J, Banzhaf S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 2007, 63(2/3): 616-626.
- [5] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [6] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [7] Burkhard B, de Groot R, Costanza R, Seppelt R, Jørgensen S E, Potschin M. Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 1-6.
- [8] Zander K K, Straton A. An economic assessment of the value of tropical river ecosystem services: Heterogeneous preferences among Aboriginal and non-Aboriginal Australians. *Ecological Economics*, 2010, 69(12): 2417-2426.
- [9] Kontogianni A, Luck G W, Skourtos M. Valuing ecosystem services on the basis of service-providing units: A potential approach to address the ' endpoint problem' and improve stated preference methods. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1479-1487.
- [10] Anton C, Young J, Harrison P A, Musche M, Bela G, Feld C K, Harrington R, Haslett J R, Pataki G, Rounsevell M D A, Skourtos M, Sousa J P, Sykes M T, Tinch R, Vandewalle M, Watt A, Settele J. Research needs for incorporating the ecosystem service approach into EU biodiversity conservation policy. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(10): 2979-2994.
- [11] 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.
- [12] Brauman K A, Daily G C, Duarte T K, Mooney H A. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 2007, 32: 67-98.
- [13] Hein L, van Koppen K, de Groot R S, van Ierland E C. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics*, 2006, 57(2): 209-228.
- [14] Naeem S. Green with complexity. *Science*, 2008, 319(5865): 913-914.
- [15] Kremen C, Williams N M, Aizen M A, Gemmill-Herren B, LeBuhn G, Minckley R, Packer L, Potts S G, Roulston T, Steffan-Dewenter I, Vázquez D P, Winfree R, Adams L, Crone E E, Greenleaf S S, Keitt T H, Klein A M, Regetz J, Ricketts T H. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology Letters*, 2007, 10(4): 299-314.
- [16] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1146-1156.
- [17] Reiss J, Bridle J R, Montoya J M, Woodward G. Emerging horizons in biodiversity and ecosystem functioning research. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(9): 505-514.
- [18] Hillebrand H, Matthiessen B. Biodiversity in a complex world: consolidation and progress in functional biodiversity research. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1405-1419.
- [19] Tilman D, Knops J, Wedin D, Reich P, Ritchie M, Siemann E. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 1997, 277(5330): 1300-1302.
- [20] Naeem S. Disentangling the impacts of diversity on ecosystem functioning in combinatorial experiments. *Ecology*, 2002, 83(10): 2925-2935.
- [21] Lavorel S, Grigulis K, Lamarque P, Colace M P, Garden D, Girel J, Pellet G, Douzet R. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology*, 2011, 99(1): 135-147.
- [22] Robards M D, Schoon M L, Meek C L, Engle N L. The importance of social drivers in the resilient provision of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2011, 21(2): 522-529.
- [23] Yapp G, Walker J, Thackway R. Linking vegetation type and condition to ecosystem goods and services. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 292-301.
- [24] Norgaard R B. Ecosystem services: From eye-opening metaphor to complexity blinder. *Ecological Economics*, 2010, 69(6): 1219-1227.
- [25] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 盖力强. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究. *自然资源学报*, 2010, 25(4): 585-593.
- [26] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 丁贤忠, 吕耀. 施肥对稻田生态系统气体调节功能及其价值的影响. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 577-583.
- [27] Serafy S. Pricing the invaluable: the value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 25-27.
- [28] Toman M. Why not to calculate the value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 57-60.
- [29] Loomis J B, Richardson R. Economic values of the U. S. wilderness system: Research evidence to date and questions for the future. *International Journal of Wilderness*, 2001, 7(1): 31-34.
- [30] Sandhu H S, Wratten S D, Cullen R. The role of supporting ecosystem services in conventional and organic arable farmland. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 302-310.
- [31] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.

- [32] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [33] 石磊, 王如松, 黄锦楼, 阳文锐. 中国陆地生态系统服务功能的时空变化分析. 科学通报, 2012, 57(9): 720-731.
- [34] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [35] 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.
- [36] Egoh B, Drakou E G, Dunbar M B, Maes J, Willemen L. Indicators for Mapping Ecosystem Services: A Review. Luxembourg: Report EUR 25456 EN, Publications Office of the European Union, 2012.
- [37] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S, Willemen L, Petz K, Palomo I, Drakou E G, Martín-Lopez B, McPhearson T, Boyanova K, Alkemade R, Egoh B, Dunbar M B, Maes J. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 4-14.
- [38] Bryan B A, King D, Ward J R. Modelling and mapping agricultural opportunity costs to guide landscape planning for natural resource management. *Ecological Indicators*, 2011, 11(1): 199-208.
- [39] CSIRO. Water Availability in the Murray-Darling Basin: A Report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Sustainable Yields Project. Australia: CSIRO, 2008.
- [40] Schulp C J E, Alkemade R, Klein Goldewijk K, Petz K. Mapping ecosystem functions and services in Eastern Europe using global-scale data sets. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2012, 8(1/2): 156-168.
- [41] Laterra P, Orúe M E, Booman G C. Spatial complexity and ecosystem services in rural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 154: 56-67.
- [42] Gascoigne W R, Hoag D, Koontz L, Tangen B A, Shaffer T L, Gleason R A. Valuing ecosystem and economic services across land-use scenarios in the Prairie Pothole Region of the Dakotas, USA. *Ecological Economics*, 2011, 70(10): 1715-1725.
- [43] Kareiva P M, Tallis H, Ricketts T H, Daily G C, Polasky S. *Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [44] Sherrouse B C, Clement J M, Semmens D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 748-760.
- [45] Costanza R. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350-352.
- [46] 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.
- [47] 杨莉, 甄霖, 潘影, 曹晓昌, 龙鑫. 生态系统服务供给-消费研究: 黄河流域案例. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 131-138.
- [48] 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, 39-39.
- [49] Maass J M, Balvanera P, Castillo A, Daily G C, Mooney H A, Ehrlich P, Quesada M, Miranda A, Jaramillo V J, García-Oliva F, Martínez-Yrizar A, Cotler H, López-Blanco J, Pérez-Jiménez A, Búrquez A, Tinoco C, Ceballos G, Barraza L, Ayala R, Sarukhán J. Ecosystem services of tropical dry forests: Insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society*, 2005, 10(1): 17-17.
- [50] 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.
- [51] Kastner T, Erb K H, Nonhebel S. International wood trade and forest change: A global analysis. *Global Environmental Change*, 2011, 21(3): 947-956.
- [52] Turner W R, Brandon K, Brooks T M, Gascon C, Gibbs H K, Lawrence K S, Mittermeier R A, Selig E R. Global biodiversity conservation and the alleviation of poverty. *BioScience*, 2012, 62(1): 85-92.
- [53] 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.
- [54] Bagstad K J, Semmens D, Winthrop R, Jaworski D, Larson J. *Ecosystem Services Valuation to Support Decisionmaking on Public Lands—A Case Study of the San Pedro River Watershed, Arizona*. Denver, CO: U. S. Geological Survey, 2012.
- [55] Bagstad K J, Semmens D J, Winthrop R. Comparing approaches to spatially explicit ecosystem service modeling: A case study from the San Pedro River, Arizona. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 40-50.
- [56] Wendland K J, Honzák M, Portela R, Vitale B, Rubinoff S, Randrianarisoa J. Targeting and implementing payments for ecosystem services: Opportunities for bundling biodiversity conservation with carbon and water services in Madagascar. *Ecological Economics*, 2010, 69(11): 2093-2107.