

人地系统耦合框架下的生态系统服务

赵文武^{1,2*}, 刘月^{1,2}, 冯强^{1,2}, 王亚萍^{1,2}, 杨思琪^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
2. 北京师范大学地理科学学部 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875)

摘要:生态系统服务是连接自然环境与人类福祉的桥梁,是人地系统耦合研究的核心内容。本文在构建生态系统服务与人地系统耦合研究框架的基础上,系统梳理了生态系统服务评估、生态系统服务权衡、生态系统服务影响因素、生态系统服务供给流动与需求等研究前沿,提出了未来生态系统服务研究的重点领域。主要研究结论认为:①国际生态系统服务模型发展迅速,SAORES模型是中国生态系统服务模型优化与参数本地化的突出代表;②生态系统服务权衡具有相对复杂的时空尺度,权衡分析的前提是辨析不同尺度生态系统结构—过程—功能—服务的作用机制;③自然因素是生态系统服务时空分布的基础,土地利用能改变生态系统结构、功能与生态系统服务变化,社会经济因素会导致生态系统服务权衡的差异;④为明晰生态系统服务供给与需求耦合关系,需进一步识别生态系统服务流的运移路径;⑤未来生态系统服务研究需加强生态系统服务对全球变化的响应特征和机制分析、面向可持续发展目标的生态系统服务供给流动与需求研究、生态系统服务的动态评价集成与优化、生态系统服务与人地系统耦合、生态系统服务与大数据集成等。

关键词:生态系统服务;评估;权衡;驱动机制;供给与需求;人地系统耦合

1 引言

作为连接自然环境与人类福祉间的桥梁,生态系统服务研究正经历着迅速发展,已成为当前地理学、生态学等领域研究的热点领域和重点方向(欧阳志云等, 2000; Sutherland et al, 2006; 傅伯杰等, 2009, 2014; 李文华等, 2009; Costanza et al, 2017)。人地系统是地理学研究的核心内容,生态系统服务作为耦合自然过程与社会过程的桥梁与纽带,为人地系统耦合研究提供了新的理论支撑。以生态系统服务为核心,近年来学者们在探讨景观格局与生态过程作用机制、辨析生态系统服务权衡协同机制及其与景观可持续性互馈关系中,逐渐形成了“格局—过程—服务—可持续性”的研究范式(赵文武等, 2016)。将该研究范式应用到人地系统耦合研

究过程中,其基本内容可以表述为:针对某一区域,探讨地理格局与过程作用机制,进行生态系统服务权衡与协同分析,辨析生态系统服务动态变化与人类福祉、可持续性的互动机制,进而有效链接自然生态系统和人类社会系统,为区域土地利用规划与生态系统服务优化调控提供科学依据(图1)。在这一研究范式中,生态系统服务是人地系统耦合的核心研究内容。目前,生态系统服务研究往往是在多元数据集成和复杂环境系统模拟的基础上,聚焦如下问题:从自然生态系统角度出发的生态系统服务评估与机制分析、考虑生态系统服务变化对人类福祉影响的生态系统服务效应分析,以及面向生态系统管理的生态系统服务调控,其具体研究内容可分解为:服务评估、权衡及影响因素分析、供需分析、情景预测和优化调控6个方面(图1)。其中,生态系

收稿日期:2018-01-11;修订日期:2018-01-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02]。

作者简介:赵文武(1976-),男,山东曹县人,教授,主要从事自然地理与景观生态研究, E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn。

引用格式:赵文武,刘月,冯强,等. 2018. 人地系统耦合框架下的生态系统服务[J]. 地理科学进展, 37(1): 139-151. [Zhao W W, Liu Y, Feng Q, et al. 2018. Ecosystem services for coupled human and environment systems[J]. Progress in Geography, 37(1): 139-151.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.015

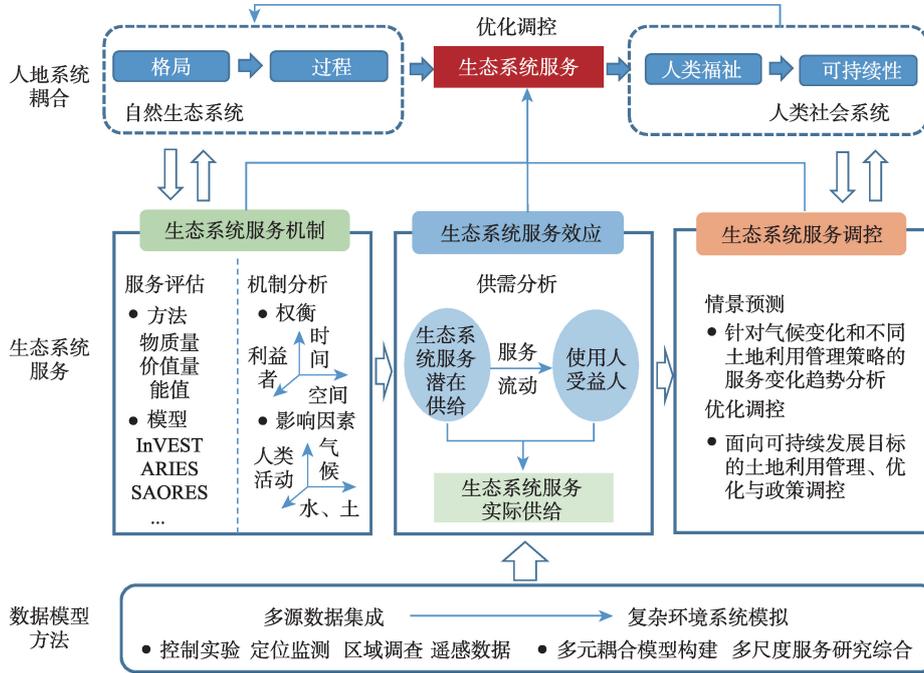


图1 生态系统服务与人地系统耦合

Fig.1 Ecosystem services and the coupled human-environment system

统服务评估、生态系统服务权衡、生态系统服务影响因素、生态系统服务供需分析是近年来生态系统服务研究的热点和前沿问题。基于此,本文结合已有文献,重点针对上述4方面研究内容,系统梳理了近年来生态系统服务的相关研究进展,探讨了生态系统服务未来研究的重点领域和方向,以期服务于地理学等相关学科的发展。

2 生态系统服务评估

现有生态系统服务评估往往是针对生态系统所能提供的服务开展的评估,也称为生态系统潜在服务能力评估或称为生态系统服务供给能力评估。生态系统评估方法和模型是生态系统服务研究的前提和基础。

2.1 生态系统服务评估方法

常见生态系统服务评估方法包括价值量评估法、物质量评估法和能值评估法(Daily, 1997)。其中,价值量评估法通过货币衡量生态系统服务价值(Costanza et al, 1997; de Groot et al, 2002),分为直接市场评价法、揭示偏好法与陈述偏好法(Vermaat et al, 2016);物质量评估法直接用物质量大小来衡量生态系统服务水平;能值评估法则用能值来衡量生态系统服务大小(Odum, 1986; Watanabe et al,

2014)。这些方法中,价值量评估法便于各项生态系统服务之间比较,评估结果可纳入国民经济核算体系,进而为不同区域或类型生态系统的生态效益核算与生态补偿模式提供支撑(李文华等, 2006; 欧阳志云等, 2016)。如全球1997年和2011年生态系统服务价值评估结果,可以为国际合作和政府决策提供科学参考(Costanza et al, 1997, 2014)。中国也有学者评估全国范围内不同生态系统所提供服务的经济价值(欧阳志云等, 1999; 谢高地等, 2001),并将其与社会经济价值比较,体现生态系统服务价值的稀缺性(谢高地等, 2015)。但是该方法在评估过程中往往存在主观性强、结果具有不确定性的问题。物质量评估法得到的结果客观、稳定,不随人们偏好与生态系统服务稀缺性而发生剧烈变化(de Groot et al, 2010);如2000-2010年中国粮食生产、碳固定、土壤保持、沙尘暴防治、水分涵养、防洪和生物多样性栖息地保护等生态系统服务的物质量评估(Ouyang et al, 2016)。但是,该方法所评估的不同服务之间量纲并不相同,往往不易于比较,也不易于为大众所熟知。能值评估法将生态系统服务转化为能值单位,有助于反映生态系统服务的真实价值,便于对比分析;但是部分生态系统服务与能值关系弱,且能值转换率不易确定(Ulgiati et al, 2009)。在上述不同方法中,物质量评估法因其连

接生态系统结构与功能,能够揭示生态系统服务的作用机理(Feng et al, 2017),将在未来较长时期的生态系统服务评估中发挥积极的作用。

2.2 国际生态系统服务评估模型

生态系统服务模型可实现多种类型生态系统服务的价值量化、空间叠置分析,以及生态系统服务价值变化、权衡/协同关系和总体效益的定量模拟等(Liu et al, 2010)。目前,国际上涌现了多个生态系统服务模型,其中常见模型有 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)、ARIES(Artificial Intelligence for Ecosystem Services)、MIMES(Multi-Scale Integrated Models of Ecosystem Services)、SolVES(Social Values for Ecosystem Services)和 EcoAIM(Ecosystem services Asset, Inventory and Management)、ESValue(Valuing Ecosystem Services)等。其中,应用最为广泛的是 InVEST 模型(Kareiva et al, 2011),它是一种生态生产过程评估和生态系统服务权衡的综合模型,可借助土地利用、环境因子、社会经济等数据评估包括生物多样性、碳储存、土壤保持等多种生态系统服务的物质量和价值量。目前,该模型在美国、中国、澳大利亚、印度尼西亚、非洲等多个国家和地区得到了广泛应用。ARIES(Villa et al, 2011)模型可以进行生态系统服务空间流动过程分析,识别生态系统服务供需矛盾。目前,该模型处于进一步完善和发展中,仅适用于美国和墨西哥部分地区。MIMES 模型(Boumans et al, 2015)将地球分为人类圈、生物圈、大气圈、水圈和岩石圈五个部分,并据此对生态系统服务的价值进行评估,但软件结构复杂,依赖参数众多,目前应用较少。SolVES、EcoAIM 和 ESValue 模型的可推广性目前也相对较弱。

总体而言,目前流行的生态系统服务工具,更侧重于基于独立的生态系统服务评估模型,以实现某些生态系统服务的供给或流向流量的量化评估;但是,在情景分析、关联关系挖掘、决策优化等环节比较薄弱(Bagstad et al, 2013),生态系统结构—过程模拟算法和服务评估结果的不确定性分析也有待提高(戴尔阜等, 2016)。目前,生态系统服务的集成评估、权衡分析及优化管理决策方面的实质性量化研究相对较少,难以满足学科发展需求。因此,生态系统服务模型除了细化生态系统结构、过程对生态系统系统服务供给的影响外,还必须考虑不同土地利用方式和管理措施之下,上述几者之

间的动态反馈;同时结合多目标优化方法,为决策者提供最佳管理方案(Liu et al, 2010)。这也是将生态系统服务应用于规划管理和决策制定中的关键点和最大的挑战(de Groot et al, 2010)。

2.3 中国生态系统服务评估模型

在生态系统服务模型的应用与发展中,模型的应用和本土化是生态系统服务“量化—权衡—决策”的重要环节(戴尔阜等, 2016),为此,需加强中国生态系统服务本土化模型的开发与应用。同时,生态系统服务评估以及与之相联系的生态系统管理决策支持工具,也必须从独立的生态系统服务评估走向多种生态系统服务的集成评估,更重要的是能基于评估结果,提供可视化的优化方案,服务于决策制定(Volk, 2015)。

针对这些需求,中国科学院生态环境研究中心傅伯杰院士研究组于 2015 年提出了基于 GIS、生态系统模型和多目标优化算法的区域生态系统服务空间评估与优化工具(Spatial Assessment and Optimization Tool for Regional Ecosystem Services, SAORES)(Hu et al, 2015)。该模型是中国科学家自主研发的第一个生态系统服务评价模型。SAORES 模型主要是为探索中国黄土高原生态修复的政策影响和优化而设计,涉及到的生态系统服务类型包括水源涵养、土壤保持、碳固定、粮食生产等,系统主要包括环境数据库与情景数据库、情景构建模块、生态系统服务模型库、综合评估与优化模块等几部分。该模型以多目标优化算法 NSGA-II 为基本框架,通过优化土地利用格局实现区域关键生态系统服务的最大化,进而实现自适应的生态系统管理(Hu et al, 2015)。与传统的生态系统服务工具相比,SAORES 模型主要在 3 个方面进行了加强:生态系统管理策略模拟和景观动态过程的情景构建;不同生态系统管理条件下多种生态系统服务的权衡和集成分析;基于生态系统服务的规划和管理决策优化方法。该模型的研究成果发表后,由于其实现了情景分析、生态系统服务量化评估以及多目标优化等多功能集成,得到了国际同行的积极评价,并认为该模型可为植树造林等生态修复项目提供科学依据(Barnett et al, 2016)。

3 生态系统服务权衡

生态系统服务之间往往表现为相互交织、复杂

的非线性关系(Bennett et al, 2009),进而出现生态系统服务之间此消彼长或彼此增益的权衡/协同关系(戴尔阜等, 2015; 傅伯杰等, 2016)。同时,由于生态系统服务种类多样、分布不均(谢高地等, 2006),加之人类需求各异(李双成等, 2014),使得人们对生态系统服务的选择也存在不同的偏好。生态系统服务权衡分析是辨析生态系统服务作用机制、遴选与优化生态系统服务类型,进而进行决策与调控的重要依据。

3.1 生态系统服务权衡类型

生态系统服务权衡为认识生态系统服务之间关系,提供了一种更加综合而辩证的途径(Lu et al, 2014)。由于生态系统服务权衡包含了诸多服务类型及利益相关者的时空关系,使其成为规划与政策制定的重要手段(Gissi et al, 2016; 彭建等, 2017; Vogdrup-Schmidt et al, 2017)。国内外已将权衡研究成果应用于农业生产(Lautenbach et al, 2013)、渔业生产(Oken et al, 2016)、海洋空间规划(White et al, 2012)、能源管理(Gissi et al, 2016)、森林经营管理(Vauhkonen et al, 2017)等诸多方面。

在生态系统服务权衡分类中,根据生态系统服务固有的时空尺度特征与其可逆与否,将生态系统服务权衡划分为:空间权衡、时间权衡和可逆性权衡(Tilman et al, 2002; Rodríguez et al, 2006);根据生态系统服务之间动态关系,归纳为:无相互关联、直接权衡、凸权衡、凹权衡、非单调凹权衡以及倒“S”型权衡等(Lester et al, 2013)。尽管权衡关系类型多样,但其形成方式相对简单,即多种服务受共同驱动因子影响而发生变化或某一服务发生改变进而影响其他服务(Bennett et al, 2009)。难点在于权衡形成过程中,如何识别相关生态系统服务驱动因子,如何科学刻画不同尺度生态系统结构—过程—功能—服务变化的相互作用机制。

3.2 生态系统服务权衡方法

生态系统服务权衡研究一般基于数学统计、空间制图、情景模拟、多目标决策和服务流动性分析等多种方法和模型,进而开展不同时空尺度下供给、调节、文化、支持四种类型服务(Raudsepp-Hearne et al, 2010; MartínLópez et al, 2012; Su et al, 2012)及其亚类服务(Bai et al, 2013; Frank et al, 2014; Zheng et al, 2016)之间权衡/协同关系的探究。有研究表明,生态系统服务权衡相关案例在一定程度上可影响政府决策(Macdonald et al, 2014),

是区域规划和生态建设的重要依据。然而,已有研究多关注区域当下生态系统服务评估与权衡/协同关系判定,较少涉及不同因素干扰下生态系统服务之间的作用机制转变,及其随时空尺度变化所表现出的权衡/协同关系的变化。基于数学关系的统计分析,可有效评估一段时间内各类生态系统服务静态供给能力的增衰与差异。在实际应用中,理解生态系统服务之间相互作用机制是判断其权衡/协同关系的理论基础,尤其在自然和人文因素干扰情况下,生态系统格局—过程—功能—服务的变化也会进一步影响服务之间作用机制,进而导致权衡/协同关系的转变。因此,深刻理解因子—生态过程—服务三者相互关系,探究因子触发的生态系统服务之间非线性动力特征改变,是辨析生态系统服务权衡机制的关键。

总体而言,生态系统服务权衡既存在于同一生态系统的内部,也发生在不同生态系统之间;既包括当前生态系统服务的权衡,也涵盖当下与未来生态系统服务的关系冲突(Rodríguez et al, 2006)。由此可见,生态系统服务权衡具有相对复杂的时空尺度,要求学者必须从不同角度充分阐明不同尺度生态系统结构—过程—功能—服务的作用机制,探讨生态系统服务权衡关系的时空动态及其影响因素,辨识其内在机制和可能发生的关系转变,以期探索促进自然生态、社会经济与人类福祉协调发展的适宜途径。

4 生态系统服务影响因素

影响生态系统服务的因素来自自然生态系统和社会经济系统,涵盖地形、土壤、生物、气候、土地利用、社会经济等多个方面。其中,自然因素是决定生态系统服务时空分布的基础;土地利用变化能通过改变生态系统结构与功能,影响生态系统服务变化;其他社会经济因素的区域分布不均与多元化发展导致人类对不同类型的生态系统服务存在着选择偏好,进而导致生态系统服务权衡与需求差异。

4.1 自然因素

地形、土壤、生物和气候因素是生态系统和地理单元的基本组成要素。生态系统结构与地理空间格局影响生态过程,进而决定着生态系统服务的时空分布。

地形因素控制中小尺度空间的水热资源分配,影响实际太阳辐射量、温度、土壤矿化速率、植被分布等众多环境条件与生态过程,直接决定生态系统服务的供给与维持。例如,不同地形位置具有不同的养分条件与地球化学循环特征(Stewart et al, 2014),湖泊、沙丘等地形变迁能引起不同物种的消长变化(Marshall, 2014),坡度坡长直接影响径流冲刷和侵蚀泥沙运移(Biesemans et al, 2000)。但是,地形对不同生态系统服务类型的正负作用并不一致。如坡面尺度淡水供给服务一般随坡度增加而增加,但粮食供给服务却相反。通过梯田建设等地形改造工程措施,可提高涵养水源、保持土壤、提供美学价值等多项生态系统服务(Wei et al, 2016)。

土壤理化性质及土壤生物多样性与生态系统服务关系密切。例如,土壤有机碳的保持与增加有利于生态系统服务提升(Milne et al, 2015),如促进土壤团聚体的形成、提高土壤抗蚀性、增加生态系统初级生产力(Sauer et al, 2011),保证粮食供给服务(Lal, 2011)。土壤水分是连接地表水与地下水的纽带,具有调节水分运移的重要功能(Wang et al, 2013)。土壤为土壤生物提供生境并维持其多样性(Rutgers et al, 2012; Sandifer et al, 2015),但是土壤生物多样性与地上部分生产力及多样性的联系尚不明晰(Fierer et al, 2012)。人口增长给土壤带来巨大压力,农业生态学试图通过改变耕作方式(少耕、免耕)与管理措施实现生态系统供给服务与其他服务的“双赢”(Fedoroff et al, 2010; Power, 2010)。目前,在政策决策中需要注重考虑常常被忽略的土壤因素(Bouma, 2014),而连接土壤与生态系统服务的研究框架(Adhikari et al, 2016)则为加强土壤在生态系统服务中的研究提供了可能。

生物多样性与生态系统服务之间关系比较复杂,一般来说生物多样性对大多数生态系统服务具有积极影响。如在草地(Zavaleta et al, 2010)、森林(Gamfeldt et al, 2013)与农业生态系统(Iverson et al, 2015)中,较高的生物多样性均有利于提高系统生产力、优化养分循环过程、提高系统稳定性。而生物多样性与生态系统服务评估指标体系的建立(傅伯杰等, 2017)将有助于推动生物因素与生态系统服务关系研究。然而,生态系统服务与生物多样性的定量关系尚不清楚(Balvanera et al, 2006),可能原因是目前生物多样性评估多基于物种多样性度量,而物种多样性并不能客观体现生态系统功能。已

有研究发现,功能多样性是生态系统服务最有力的预测者(Mouillot et al, 2011),对其展开相关研究可实现生物因素与生态系统服务的科学连接。

气候因素特别是水热条件决定着生态系统的结构与功能,同时生态系统与气候之间存在复杂的反馈关系。对农业生态系统来说,二氧化碳浓度升高总体上能增加作物产量,但不同作物响应程度有所差异(Xiong et al, 2012)。气候变化影响物种与生态系统的分布,有助于中国森林生态系统净初级生产力整体增加(Fang et al, 2003),但是暖干化趋势也增加了森林火灾的风险。不同生态系统服务对气候因素的响应并不相同,往往需要将气候变化预测与政策管理情景相结合,通过制定科学政策以应对气候变化对生态系统服务的不利影响(Mina et al, 2017)。

4.2 土地利用与社会经济因素

土地利用变化直接改变生态系统的结构与功能,进而影响生态系统服务变化(肖玉等, 2012; 傅伯杰等, 2014)。土地利用变化是生物多样性降低的直接或间接原因(Tscharntke et al, 2010),如毁林开荒与围湖造田等活动短期内提高了粮食与原材料供给服务,但损害了长期的支持与调节服务;土地利用变化影响生态系统调节服务(Su et al, 2013),如森林的径流调节能力远远高于建设用地;土地利用变化对支持服务同样存在深刻影响,如城市化降低生态系统碳储量,改变地球化学循环(李锋等, 2014)。不同土地利用类型生态系统服务的供给差异是权衡产生的主要原因,如耕地具有较高的供给服务提供能力,但调节、支持与文化服务能力较弱;森林和草地的调节服务与支持服务能力最强,但供给服务能力较弱(傅伯杰等, 2014)。因此,土地利用变化能改变生态系统服务相互关系,表现出不同的变化类型。已有研究表明,通过有效的土地利用管理策略能实现各项生态系统服务的“双赢”(Goldstein et al, 2012),情景分析与多目标优化则是制定管理决策的重要手段。

人口、教育、社会阶层、政策法规、宗教文化、城市化、经济水平等社会经济因素的区域分布不均与多元化发展,导致人类对不同类型的生态系统服务存在着选择偏好,进而导致生态系统服务权衡与需求差异。如经济与人口增长带来资源需求,人们对供给服务的偏好往往高于调节、文化与支持服务,进而引起生态系统服务权衡(Rodríguez et al,

2006)。游客因其文化背景、思想意识与教育水平的差异,对生态系统服务的感知也表现出明显的不同(Zoderer et al, 2016)。政策与法律因素直接反映社会对生态系统服务的需求与管理。例如,天然林保护工程与退耕还林(草)工程是中国乃至世界范围内最大的为生态系统服务付费的政策项目,是调节生态系统服务的重要政策手段。这些工程措施所带来的生态效应总体是有益的,但由于生态效应存在时滞,未来的长期影响或将与当前效益的有所不同(Liu et al, 2008)。

5 生态系统服务供给、流动与需求

生态系统服务作为连接生物物理过程(自然生态系统)和人类福祉(社会经济系统)的桥梁,其研究应包括自然和经济社会两方面:既关注服务产生的生态系统服务供给,同时重视人类从自然中获得惠益的生态系统服务需求(Boerema et al, 2017)。生态系统服务流是实现生态系统服务供给与需求耦合的中间环节。

5.1 生态系统服务供需框架

生态系统服务供给取决于生态系统结构、过程和功能,其客观存在而不以人的意志为转移,可称其为生态系统提供服务的潜在能力,相应英文表述为 ecosystem service capacity (Schröter et al, 2014)、ecosystem service potential (Bagstad et al, 2014)、ecosystem service supply (Jones et al, 2016) 或 ecosystem service provision。当这种生态系统服务供给被人类使用消费,用于满足人类需求和带来一系列惠益时,这种潜在的生态系统供给即变为生态系统为人类提供的实际生态系统服务,相应英文表述为 actual ecosystem service 或 realized ecosystem service (Burkhard et al, 2014)。因此,生态系统服务的研究需从供给、需求及其相互联系开展。在这种理念的影响下,区别于传统的“结构—功能—服务—惠益—价值”生态系统服务级联评估框架,学者们提出了“景观服务能力—景观服务流—景观服务需求”的研究框架(Fang et al, 2015)、连接生态系统与社会经济系统的供需评估研究框架(Boerema et al, 2017)等(图2)。该类框架通过从概念和评估框架两方面区分了生态系统提供服务的能力和生态系统服务实际的需求,表明人类需求在生态系统服务研究中的必要性,指出须同时关注人类社会经济发展

阶段和生态系统演替的动态变化造成的生态系统服务供给和需求变化(Locatelli et al, 2014)。在此基础上,可从生态系统服务产生、传输到使用的不同环节,开展生态系统服务与景观可持续性评价(Fang et al, 2015)。

5.2 生态系统服务供给与需求

近年来,许多研究开始关注并强调生态系统服务需求,针对不同的服务类型尝试对受益人的位置及需求量进行分析。供给类服务的需求可用研究区实际消耗的能源、水和食物的数量表示(杨莉等, 2012);对调节服务来说,可通过缺少服务后遭受损失区域来识别受益人的位置,然后以满足人类所需环境状况的调节量来确定需求总量(Stürck et al, 2014)。文化服务可通过体验服务的人口数量来表示服务需求,如景观区内接待的游客数量(Schirpke et al, 2014)。由于目前有关生态系统服务需求的定量分析研究较少,具体指标选择还处于探讨阶段。就评价方法而言,主要是基于土地利用和社会经济调查数据对生态系统服务需求进行空间化,在大尺度分析中,也可利用遥感数据反演夜间灯光分布进而提取人口密度等指标来反映人类需求(Ayanu et al, 2012)。与此同时,许多研究开始将生态系统服务供给与需求的特征相联系并对分析其平衡状况,通常采用的方法是基于土地利用、社会经济调查数据或模型模拟分别对供给和需求进行空间化,然后再叠加分析。如在生物能源供给需求分析中,将耕地、森林作为燃料作物的供给区域,将城市、工业等用地类型作为需求区域,然后综合分析其供需空间格局特征(Kroll et al, 2012)。在研究全球授粉服务时,也可以将昆虫栖息地作为服务供给区域,将种植区作为服务的需求区域(Serna-Chavez

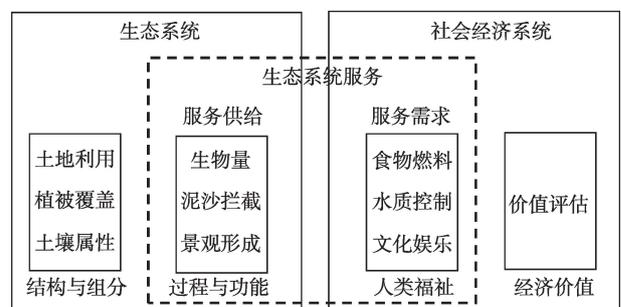


图2 生态系统服务供需评估框架

(改自 Boerema et al, 2017)

Fig.2 A framework for assessing the supply and demand of ecosystem services (based on Boerema et al, 2017)

et al, 2014),以需求区面积大小来衡量需求强度。

5.3 生态系统服务流

在生态系统服务供给和需求分析中,需对生态系统服务从产生到使用的传输过程进行研究,明确生态系统服务从哪里产生和在哪里被使用,即生态系统服务流的研究。生态系统服务流是供给区产生的生态系统服务,依靠某种载体,在自然因素或人为因素的驱动下,沿着一定的方向与路径传递到使用区的时空过程(刘慧敏等, 2016)。理解生态系统供给和效益实现的空间关系是研究生态系统服务流动的基础,根据服务供给与使用的空间特征关系可将生态系统服务分为全球非临近、局部邻近、流动方向性、原位性和使用者迁移性等5种类型(Costanza, 2008; 马琳等, 2017)。相应地,生态系统服务流分为原位服务流、全向服务流和定向服务流3种类型(Fisher et al, 2009; 肖玉等, 2016)。土壤形成所产生的支持服务,其生态系统服务供给和使用在同一位置或区域内,属于原位服务流;空气净化、碳汇等调节服务往往是在某一位置发生,但是可从不同方向传输到使用该服务的区域,属于全向服务流;而上游地区生态系统控制土壤侵蚀,进而为下游提供的侵蚀控制服务,只能沿着水系从上游到下游这一固定方向进行传输,属于定向服务流。生态系统服务传输通常是要借助某种生物或者非生物的媒介,这种媒介可能是某种物质、信息或者能量。例如,水源供给服务需要通过河流向人类提供服务,旅游文化服务则是通过公路、铁路等交通使人类获得服务(Bagstad et al, 2013)。在生态系统/景观服务供给—流动—需求研究中,一般包括以下几个步骤:①确定服务供给区域与受益人群的空间位置;②确定生态系统服务传输的媒介;③刻画生态系统服务随媒介流向人类的过程与机理,并且通过过程分析,识别影响生态系统服务流的限制因素;④在明确机理与过程的基础上对生态系统服务流进行量化与制图;⑤通过对生态系统服务实际流向人类的量与生态服务供给能力进行比较从而测算生态系统服务的传输效率(Fang et al, 2015)。学者们利用框架分析(Bagstad et al, 2014)、模型模拟(Serna-Chavez et al, 2014)等方法,从不同角度对生态系统服务流进行了量化和制图,但由于生态系统服务从供给区到受益区流动的复杂性和动态特征,定量评价其流动过程中的消耗转移量以及描述其确切的流动路径成为该领域研究中的困难和挑战

(马琳等, 2017)。

6 生态系统服务研究展望

在全球环境变化与可持续发展的宏观背景下,生态系统服务研究需要深化作用机制、供需动态与情景趋势分析,发展生态系统服务集成模型,有待在如下领域取得新的发展与突破。

(1) 生态系统服务对全球变化的响应特征和机制分析。以往研究注重不同空间尺度下的生态系统结构与过程,但辨析生态过程对生态系统服务的作用机制以及生态系统服务间权衡关系时空动态的研究有待于深化,尤其需要加强耦合气候变化与生态系统服务、人类活动与生态系统服务动态分析,亟待明确全球变化背景下,生态系统结构、过程对生态系统服务时空格局的影响机制与演变趋势,进而提出适应全球变化的生态系统可持续管理对策。

(2) 面向可持续发展目标的生态系统服务供给、流动与需求研究。生态系统服务研究的最终目的是通过合理的生态系统管理利用,提高人类福祉,进而实现可持续发展。目前,联合国已经提出了新的17项全球可持续发展目标。在未来的研究中,基于17项全球可持续发展目标,探讨全球不同区域对生态系统服务需求的差异;在此基础上,分析不同类型生态系统服务供给与可持续发展目标间的关系,明确实现可持续发展目标所需要的生态系统服务供给和生态系统流动机理,探讨生态系统服务供给和需求变化的动态特征及驱动因素,建立生态系统服务供给和人类福祉之间的动态互馈机制,进而指导生态系统的科学管理并逐步推进可持续发展目标的实现。

(3) 生态系统服务的动态评价、集成与优化。目前生态系统服务的研究多聚焦于局地尺度,对于宏观尺度生态系统服务时空异质性评估有待进一步加强,生态系统服务的评价研究尚未得到足够重视,需要加强生态系统服务多尺度集成研究。同时,生态系统服务模型经历了从统计模型向过程模型的深化转变,逐步实现了多元驱动因子的整合、多重空间要素的耦合以及多重时空尺度的衔接。在未来的研究中,有待于通过完善生态系统服务评估指标与评估方法,进一步发展生态系统服务多元耦合机理模型,集成气候和土地利用变化情景,模拟和预测气候变化对生态系统服务的影响,进行多

目标优化设计,不仅为全球和区域可持续发展多目标调控方案的制定提供理论基础,并可应用于土地利用规划和生态系统管理决策的不同阶段。

(4) 生态系统服务与人地系统耦合。人地关系是地理学研究的核心,人地系统耦合是地理学研究的前沿领域。生态系统服务研究作为连接自然生态系统与社会经济系统的桥梁,为研究人地系统耦合提供了重要研究思路和方法。在未来人地系统耦合研究中,有待于以景观格局、生态过程与生态系统服务、可持续性研究为纽带,耦合陆地表层系统的自然过程与人为过程,开展不同尺度的监测调查、模型模拟、情景分析和优化调控,推动地理学研究范式从格局与过程耦合,向复杂人地系统模拟预测转变(傅伯杰, 2017)。

(5) 生态系统服务与大数据集成。遥感、GIS技术的发展以及多源数据可利用性的提升,有效地推动了生态系统服务研究的深化,然而多源异构数据同化能力的不足导致了生态系统服务评估数据源仍存在明显的不确定性,制约了对生态系统服务演变机制的客观揭示。模型模拟和预测一方面极大地促进了生态系统服务的评估和动态变化研究,另一方面又容易在不准确的数据源输入下得出误导性结论,对未来的可持续生态系统管理造成不利影响。依托日益提升的地理空间大数据信息挖掘技术,整合多尺度下生态系统服务局地供给、生态系统服务区域需求、生态系统服务管理目标等多要素、多过程参数信息,研发基于大数据集成的生态系统服务权衡分析模型和多目标优化系统,为全球、国家和区域生态系统服务可持续管理提供更加精准可靠的决策支持。

参考文献(References)

戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 2015. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望[J]. 地球科学进展, 30(11): 1250-1259. [Dai E F, Wang X L, Zhu J J, et al. 2015. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs[J]. *Advances in Earth Science*, 30(11): 1250-1259.]

戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 2016. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架[J]. 地理研究, 35(6): 1005-1016. [Dai E F, Wang X L, Zhu J J, et al. 2016. Methods, tools and research framework of ecosystem service trade-offs[J]. *Geographical Research*, 35(6): 1005-1016.]

傅伯杰, 于丹丹. 2016. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资

源科学, 38(1): 1-9. [Fu B J, Yu D D. 2016. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services[J]. *Resources Science*, 38(1): 1-9.]

傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 2017. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J]. 生态学报, 37(2): 341-348. [Fu B J, Yu D D, Lü N. 2017. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(2): 341-348.]

傅伯杰, 张立伟. 2014. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. 地理科学进展, 33(4): 441-446. [Fu B J, Zhang L W. 2014. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress[J]. *Progress in Geography*, 33(4): 441-446.]

傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 等. 2009. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展, 24(6): 571-576. [Fu B J, Zhou G Y, Bai Y F, et al. 2009. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China[J]. *Advances in Earth Science*, 24(6): 571-576.]

李锋, 王如松, 赵丹. 2014. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望[J]. 生态学报, 34(1): 190-200. [Li F, Wang R S, Zhao D. 2014. Urban ecological infrastructure based on ecosystem services: Status, problems and perspectives[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(1): 190-200.]

李双成, 王珏, 朱文博, 等. 2014. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架[J]. 地理学报, 69(11): 1628-1639. [Li S C, Wang J, Zhu W B, et al. 2014. Research framework of ecosystem services geography from spatial and regional perspectives[J]. *Acta Geographica Sinica*, 69(11): 1628-1639.]

李文华, 李芬, 李世东, 等. 2006. 森林生态效益补偿的研究现状与展望[J]. 自然资源学报, 21(5): 677-688. [Li W H, Li F, Li S D, et al. 2006. The status and prospect of forest ecological benefit compensation[J]. *Journal of Natural Resources*, 21(5): 677-688.]

李文华, 张彪, 谢高地. 2009. 中国生态系统服务研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报, 24(1): 1-10. [Li W H, Zhang B, Xie G D. 2009. Research on ecosystem services in China: Progress and perspectives[J]. *Journal of Natural Resources*, 24(1): 1-10.]

刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 2016. 生态系统服务流研究进展[J]. 应用生态学报, 27(7): 2161-2171. [Liu H M, Fan Y L, Ding S Y. 2016. Research progress of ecosystem service flow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(7): 2161-2171.]

马琳, 刘浩, 彭建, 等. 2017. 生态系统服务供给和需求研究

- 进展[J]. 地理学报, 72(7): 1277-1289. [Ma L, Liu H, Peng J, et al. 2017. A review of ecosystem services supply and demand[J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(7): 1277-1289.]
- 欧阳志云, 王如松. 2000. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展[J]. 世界科技研究与发展, 22(5): 45-50. [Ouyang Z Y, Wang R S. 2000. Ecosystem services and their economic valuation[J]. *World Sci-Tech R & D*, 22(5): 45-50.]
- 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 1999. 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[J]. 生态学报, 19(5): 607-613. [Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. 1999. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 19(5): 607-613.]
- 欧阳志云, 郑华, 谢高地, 等. 2016. 生态资产、生态补偿及生态文明科技贡献核算理论与技术[J]. 生态学报, 36(22): 7136-7139. [Ouyang Z Y, Zheng H, Xie G D, et al. 2016. Accounting theories and technologies for ecological assets, ecological compensation and scientific and technological contribution to ecological civilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(22): 7136-7139.]
- 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 2017. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策[J]. 地理学报, 72(6): 960-973. [Peng J, Hu X X, Zhao M Y, et al. 2017. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making[J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(6): 960-973.]
- 肖玉, 谢高地, 安凯, 等. 2012. 基于功能性状的生态系统服务研究框架[J]. 植物生态学报, 36(4): 353-362. [Xiao Y, Xie G D, An K, et al. 2012. A research framework of ecosystem services based on functional traits[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36(4): 353-362.]
- 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 2016. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展[J]. 生态学报, 36(10): 3096-3102. [Xiao Y, Xie G D, Lu C X, et al. 2016. Involvement of ecosystem service flows in human wellbeing based on the relationship between supply and demand[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(10): 3096-3102.]
- 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 2006. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式[J]. 植物生态学报, 30(2): 191-199. [Xie G D, Xiao Y, Lu C X. 2006. Study on ecosystem services: Progress, limitation and basic paradigm[J]. *Journal of Plant Ecology*, 30(2): 191-199.]
- 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 2015. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 37(9): 1740-1746. [Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. 2015. The value of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 37(9): 1740-1749.]
- 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 2001. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报, 16(1): 47-53. [Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, et al. 2001. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 16(1): 47-53.]
- 杨莉, 甄霖, 潘影, 等. 2012. 生态系统服务供给—消费研究: 黄河流域案例[J]. 干旱区资源与环境, 26(3): 131-138. [Yang L, Zhen L, Pan Y, et al. 2012. Ecosystem services supply and consumption: A case in Yellow River watershed, China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(3): 131-138.]
- 赵文武, 王亚萍. 2016. 1981-2015年我国大陆地区景观生态学文献分析[J]. 生态学报, 36(23): 7886-7896. [Zhao W W, Wang Y P. 2016. A bibliometric analysis of landscape ecology in China mainland between 1981 and 2015[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(23): 7886-7896.]
- Adhikari K, Hartemink A E. 2016. Linking soils to ecosystem services—a global review[J]. *Geoderma*, 262: 101-111.
- Ayanu Y Z, Conrad C, Nauss T, et al. 2012. Quantifying and mapping ecosystem services supplies and demands: A review of remote sensing applications[J]. *Environmental Science & Technology*, 46(16): 8529-8541.
- Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, et al. 2013. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services[J]. *Ecosystem Services*, 4: 117-125.
- Bagstad K J, Villa F, Batker D, et al. 2014. From theoretical to actual ecosystem services: Mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments[J]. *Ecology and Society*, 19(2): 64.
- Bai Y, Zheng H, Ouyang Z Y, et al. 2013. Modeling hydrological ecosystem services and tradeoffs: A case study in Baiyangdian watershed, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 70(2): 709-718.
- Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, et al. 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services[J]. *Ecology Letters*, 9(10): 1146-1156.
- Barnett A, Fargione J, Smith M P. 2016. Mapping trade-offs in ecosystem services from reforestation in the Mississippi Alluvial Valley[J]. *BioScience*, 66(3): 223-237.
- Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. *Ecology Letters*, 12(12): 1394-1404.
- Biesemans J, van Meirvenne M, Gabriels D. 2000. Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accu-

- mulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(1): 35-42.
- Boerema A, Rebelo A J, Bodi M B, et al. 2017. Are ecosystem services adequately quantified[J]. *Journal of Applied Ecology*, 54(2): 358-370.
- Bouma J. 2014. Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: Linking soil functions with ecosystem services[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(2): 111-120.
- Boumans R, Roman J, Altman I, et al. 2015. The Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services (MIMES): Simulating the interactions of coupled human and natural systems [J]. *Ecosystem Services*, 12: 30-41.
- Burkhard B, Kandziora M, Hou Y, et al. 2014. Ecosystem service potentials, flows and demands: Concepts for spatial localisation, indication and quantification[J]. *Landscape Online*, 34: 1-32.
- Costanza R. 2008. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed[J]. *Biological Conservation*, 141(2): 350-352.
- Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 387: 253-260.
- Costanza R, Groot R D, Braat L, et al. 2017. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go[J]. *Ecosystem Services*, 28: 1-16.
- Costanza R, Groot R D, Sutton P, et al. 2014. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 26: 152-158.
- Daily G C. 1997. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*[M]. Washington DC: Island Press.
- de Groot R S, Alkemade R, Braat L, et al. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making[J]. *Ecological Complexity*, 7(3): 260-272.
- de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 41(3): 393-408.
- Fang J Y, Piao S L, Field C B, et al. 2003. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(6): 293-297.
- Fang X N, Zhao W W, Fu B J, et al. 2015. Landscape service capability, landscape service flow and landscape service demand: A new framework for landscape services and its use for landscape sustainability assessment[J]. *Progress in Physical Geography*, 39(6): 817-836.
- Fedoroff N V, Battisti D S, Beachy R N, et al. 2010. Radically rethinking agriculture for the 21st century[J]. *Science*, 327: 833-834.
- Feng Q, Zhao W W, Fu B J, et al. 2017. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: A case study in the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 607-608: 1250-1263.
- Fierer N, Leff J W, Adams B J, et al. 2012. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(52): 21390-21395.
- Fisher B, Turner R K, Morling P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making[J]. *Ecological Economics*, 68(3): 643-653.
- Frank S, Fürst C, Witt A, et al. 2014. Making use of the ecosystem services concept in regional planning-trade-offs from reducing water erosion[J]. *Landscape Ecology*, 29(8): 1377-1391.
- Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R, et al. 2013. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species[J]. *Nature Communications*, 4: 1340.
- Gissi E, Gaglio M, Reho M. 2016. Sustainable energy potential from biomass through ecosystem services trade-off analysis: The case of the Province of Rovigo (Northern Italy)[J]. *Ecosystem Services*, 18: 1-19.
- Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, et al. 2012. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(19): 7565-7570.
- Hu H T, Fu B J, Lü Y H, et al. 2015. SAORES: A spatially explicit assessment and optimization tool for regional ecosystem services[J]. *Landscape Ecology*, 30(3): 547-560.
- Iverson A L, Marín L E, Ennis K K, et al. 2015. Do polycultures promote win-wins or trade-offs in agricultural ecosystem services? A meta-analysis[J]. *Journal of Applied Ecology*, 51(6): 1593-1602.
- Jones L, Norton L, Austin Z, et al. 2016. Stocks and flows of natural and human-derived capital in ecosystem services [J]. *Land Use Policy*, 52: 151-162.
- Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H, et al. 2011. *Natural capital: Theory and practice of mapping ecosystem services*[M]. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Kroll F, Müller F, Haase D, et al. 2012. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynam-

- ics[J]. *Land Use Policy*, 29(3): 521-535.
- Lal R. 2011. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems [J]. *Food Policy*, 36(S1): S33-S39.
- Lautenbach S, Volk M, Strauch M, et al. 2013. Optimization-based trade-off analysis of biodiesel crop production for managing an agricultural catchment[J]. *Environmental Modelling & Software*, 48: 98-112.
- Lester S E, Costello C, Halpern B S, et al. 2013. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning[J]. *Marine Policy*, 38: 80-89.
- Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, et al. 2008. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(28): 9477-9482.
- Liu S, Costanza R, Farber S, et al. 2010. Valuing ecosystem services: Theory, practice, and the need for a transdisciplinary synthesis[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185(1): 54-78.
- Locatelli B, Imbach P, Wunder S. 2014. Synergies and tradeoffs between ecosystem services in Costa Rica[J]. *Environmental Conservation*, 41(1): 27-36.
- Lu N, Fu B J, Jin T T, et al. 2014. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 29(10): 1697-1708.
- MacDonald D H, Bark R H, Coggan A. 2014. Is ecosystem service research used by decision-makers? A case study of the Murray-Darling Basin, Australia[J]. *Landscape Ecology*, 29(8): 1447-1460.
- Marshall J M. 2014. Influence of topography, bare sand, and soil pH on the occurrence and distribution of plant species in a lacustrine dune ecosystem[J]. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 141(1): 29-38.
- Martín-López B, Iniesta-Arandia I, García-Lorente M, et al. 2012. Uncovering ecosystem service bundles through social preferences[J]. *PLoS One*, 7(6): e38970.
- Milne E, Banwart S A, Noellemeyer E, et al. 2015. Soil carbon, multiple benefits[J]. *Environmental Development*, 13: 33-38.
- Mina M, Bugmann H, Cordonnier T, et al. 2017. Future ecosystem services from European mountain forests under climate change[J]. *Journal of Applied Ecology*, 54(2): 389-401.
- Mouillot D, Villéger S, Scherer-Lorenzen M, et al. 2011. Functional structure of biological communities predicts ecosystem multifunctionality[J]. *PLoS One*, 6(3): e17476.
- Odum H T. 1986. *Emergy in ecosystems*[M]//Polunin N. *Ecosystem theory and application*. New York: John Wiley & Sons.
- Oken K L, Essington T E. 2016. Evaluating the effect of a selective piscivore fishery on rockfish recovery within marine protected areas[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 73(9): 2267-2277.
- Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, et al. 2016. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. *Science*, 352: 1455-1459.
- Power A G. 2010. Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554): 2959-2971.
- Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. 2010. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(11): 5242-5247.
- Rodríguez J P, Beard T D, Bennett E M, et al. 2006. Trade-offs across space, time, and ecosystem services[J]. *Ecology and Society*, 11(1): 28.
- Rutgers M, van Wijnen H J, Schouten A J, et al. 2012. A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms[J]. *Science of the Total Environment*, 415: 39-48.
- Sandifer P A, Sutton-Grier A E, Ward B P. 2015. Exploring connections among nature, biodiversity, ecosystem services, and human health and well-being: Opportunities to enhance health and biodiversity conservation[J]. *Ecosystem Services*, 12: 1-15.
- Sauer T J, Norman J M, Sivakumar M V K. 2011. Sustaining soil productivity in response to global climate change: Science, policy, and ethics[J]. *Vadose Zone Journal*, 11(2): 531-531.
- Schirpke U, Scolozzi R, De Marco C, et al. 2014. Mapping beneficiaries of ecosystem services flows from natura 2000 sites[J]. *Ecosystem Services*, 9: 170-179.
- Schröter M, Barton D N, Remme R P, et al. 2014. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: A conceptual model and a case study for Telemark, Norway[J]. *Ecological Indicators*, 36: 539-551.
- Serna-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, et al. 2014. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 39: 24-33.
- Sherrouse B C, Clement J M, Semmens D J. 2011. A GIS ap-

- plication for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services[J]. *Applied Geography*, 31(2): 748-760.
- Stewart K J, Grogan P, Coxson D S, et al. 2014. Topography as a key factor driving atmospheric nitrogen exchanges in arctic terrestrial ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 70: 96-112.
- Stürck J, Poortinga A, Verburg P H. 2014. Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe[J]. *Ecological Indicators*, 38: 198-211.
- Su C H, Fu B J. 2013. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes [J]. *Global and Planetary Change*, 101: 119-128.
- Su C-H, Fu B-J, He C-S, et al. 2012. Variation of ecosystem services and human activities: A case study in the Yanhe Watershed of China[J]. *Acta Oecologica*, 44: 46-57.
- Sutherland W J, Armstrong-Brown S, Armsworth P R, et al. 2006. The identification of 100 ecological questions of high policy relevance in the UK[J]. *Journal of Applied Ecology*, 43(4): 617-627.
- Tilman D, Cassman K G, Matson P A, et al. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. *Nature*, 418: 671-677.
- Tscharntke T, Klein A M, Kruess A, et al. 2010. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity-ecosystem service management[J]. *Ecology Letters*, 8(8): 857-874.
- Uligiati S, Brown M T. 2009. Emergy and ecosystem complexity[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14(1): 310-321.
- Vauhkonen J, Ruotsalainen R. 2017. Assessing the provisioning potential of ecosystem services in a Scandinavian boreal forest: Suitability and tradeoff analyses on grid-based wall-to-wall forest inventory data[J]. *Forest Ecology and Management*, 389: 272-284.
- Vermaat J E, Wagtendonk A J, Brouwer R, et al. 2016. Assessing the societal benefits of river restoration using the ecosystem services approach[J]. *Hydrobiologia*, 769(1): 121-135.
- Villa F, Bagstad K J, Johnson G W, et al. 2011. Scientific instruments for climate change adaptation: Estimating and optimizing the efficiency of ecosystem service provision [J]. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 11(1): 83-98.
- Vogdrup-Schmidt M, Strange N, Olsen S B, et al. 2017. Trade-off analysis of ecosystem service provision in nature networks[J]. *Ecosystem Services*, 23: 165-173.
- Volk M. 2015. Modelling ecosystem services: Current approaches, challenges and perspectives[J]. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 5: 1-2.
- Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. 2013. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 193-194: 300-310.
- Watanabe M D B, Ortega E. 2014. Dynamic emergy accounting of water and carbon ecosystem services: A model to simulate the impacts of land-use change[J]. *Ecological Modelling*, 271: 113-131.
- Wei W, Chen D, Wang L X, et al. 2016. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing[J]. *Earth-Science Reviews*, 159: 388-403.
- White C, Halpern B S, Kappel C V. 2012. Ecosystem service tradeoff analysis reveals the value of marine spatial planning for multiple ocean uses[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(12): 4696-4701.
- Xiong W, Holman I, Lin E, et al. 2012. Untangling relative contributions of recent climate and CO₂ trends to national cereal production in China[J]. *Environmental Research Letters*, 7(4): 044014, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044014.
- Zavaleta E S, Pasari J D, Hulvey K D, et al. 2010. Sustaining multiple ecosystem functions in grassland communities requires higher biodiversity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(4): 1443-1446.
- Zheng Z M, Fu B J, Feng X M. 2016. GIS-based analysis for hotspot identification of tradeoff between ecosystem services: A case study in Yanhe Basin, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 26(4): 466-477.
- Zoderer B M, Stanghellini P S L, Tasser E, et al. 2016. Exploring socio-cultural values of ecosystem service categories in the central Alps: The influence of socio-demographic factors and landscape type[J]. *Regional Environmental Change*, 16(7): 2033-2044.

Ecosystem services for coupled human and environment systems

ZHAO Wenwu^{1,2*}, LIU Yue^{1,2}, FENG Qiang^{1,2}, WANG Yaping^{1,2}, YANG Siqu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Ecosystem services bridge the natural environment and human well-being, and are the key content of coupled human-environment system research. This article puts forward a framework of research on ecosystem services for coupled human-environment systems, and systematically reviews the research hotspots of ecosystem services evaluation, ecosystem services trade-offs, ecosystem services driving factors, ecosystem supply-flow-demand, and identifies the key areas for future ecosystem services research. This article argues that: (1) international research on ecosystem services models have experienced a rapid development, and SAORES model is the outstanding representative of ecosystem service evaluation model in China; (2) ecosystem service trade-off analyses are relatively complex, and its mechanism depends on distinguish the relationships among ecosystem structure-process-function-service at multiple spatial and temporal scales; (3) natural factors are the basis of ecosystem services distribution, land use change can modify ecosystem structure, function, and services, and social and economic factors can lead to differences in ecosystem services trade-off and demand; (4) in order to clarify the coupling relationship between ecosystem service supply and demand, it is urgently needed to further identify the pathes of ecosystem service flowes; (5) future research of ecosystem services should include strengthening the analyses on the response of ecosystem services to global change, ecosystem services supply and demand flow focusing on the sustainable development aspect, integration and optimization of the dynamic evaluation of ecosystem services, the coupling of ecosystem services and human-environment systems, and the integration of ecosystem services and big data.

Key words: ecosystem services; assessment; trade-offs; driving mechanism; supply and demand; coupled human and environment system