

生态系统服务权衡与协同研究进展

曹祺文¹ 卫晓梅¹ 吴健生^{1,2*}

(¹北京大学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; ²北京大学城市与环境学院资源与环境地理系/地表过程与模拟教育部重点实验室,北京 100871)

摘要 作为链接人类福祉和生态系统的桥梁,生态系统服务成为地理学、生态学和其他相关学科的重要研究内容。掌握生态系统服务权衡与协同关系,对提升生态系统服务总体效益和人类福祉至关重要,并可辅助自然资源管理和生态规划实践,目前已成为生态系统服务研究的热点。在归纳生态系统服务内涵、分类及价值评估研究进展基础上,从理论基础、类型划分和研究方法等方面系统梳理了生态系统服务权衡与协同研究进展,并从以下4个方面提出未来可能的研究趋势,包括丰富权衡与协同理论基础,建构多学科综合研究体系;完善生态系统服务分类体系,量化权衡与协同非线性特征;刻画生态系统服务空间流动,加强权衡与协同跨时空集成;系统化揭示权衡与协同机理,推动成果在国土领域的应用。

关键词 生态系统服务; 权衡; 协同; 价值评估; 跨时空集成

A review on the tradeoffs and synergies among ecosystem services. CAO Qi-wen¹, WEI Xiao-mei¹, WU Jian-sheng^{1,2*} (¹The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning & Design, Peking University, Shenzhen 518055, China; ²College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China).

Abstract: As the linkage of human well-being and ecosystem, ecosystem services have become an important content of researches in geography, ecology and other related disciplines. It is essential to understand the tradeoffs and synergies among ecosystem services for the promotion of overall benefit and human well-being and for natural resources management and ecological planning. It has become a hotspot in the ecosystem services research. Firstly, this paper summarizes the connotation, classification and assessment methods of ecosystem services. Secondly, the progress of research on synergies and tradeoffs among ecosystem services is reviewed from the perspectives of theoretical basis, classification and methodologies. Lastly, the possible research trends in future are put forward from four perspectives, including the adoption of other disciplines' theories and the construction of an integrated multidisciplinary research framework; the perfection of ecosystem services classification and the quantification of non-linear feature of synergies and tradeoffs; the depiction of spatial flow of ecosystem services and the strengthening of spatial and temporal integration of synergies and tradeoffs; and the systematic discovery of mechanism of synergies and tradeoffs and the application of the research findings in the field of land use planning and management.

Key words: ecosystem services; tradeoff; synergy; valuation assessment; spatio-temporal integration.

生态系统服务是指生态系统所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用(Daily,

1997),是人类直接或间接地从生态系统中所获得的所有收益(Costanza *et al.*, 1997),涵盖有形服务(如食物生产)和无形服务(如美学或文化价值),Costanza等(1997)将生态系统服务分为气体调节、气候调节、水供应、土壤形成、授粉、粮食生产、原材

国家自然科学基金重点项目(41330747)资助。
收稿日期: 2016-03-07 接受日期: 2016-07-28
* 通讯作者 E-mail: wuj@pku.edu.cn

料供给、娱乐、文化等 17 种类型。2001—2005 年实施的千年生态系统评估 (Millennium Ecosystem Assessment, MA) 在此基础上将生态系统服务分为 4 种广泛应用的服务类型,即供给服务、调节服务、支持服务和文化服务 (MA, 2005),并指出生态系统服务与人类福祉间相互依存的动态关系。作为链接生态系统与社会经济系统的桥梁 (Fu *et al.*, 2013),生态系统服务成为生态学、地理学、环境经济学等学科的热点和前沿问题 (Smith *et al.*, 2012; Vidal-Legaz *et al.*, 2013; 傅伯杰等, 2016)。

在特定时空尺度下,各生态系统服务间并不是完全独立的 (Nelson *et al.*, 2008),而是表现出复杂的相互作用关系 (Brauman *et al.*, 2007; Barbier *et al.*, 2008),这种相互作用关系就形成了各类型服务间的权衡 (tradeoffs) 或协同 (synergies) 结果。在生态系统服务中,权衡是指某些类型生态系统服务的增加或减少,导致其他类型生态系统服务减少或增加的情形 (Rodríguez *et al.*, 2006),协同是指两种或多种生态系统服务同时增强或同时减少的情形 (李鹏等, 2012; 戴尔阜等, 2015)。正因为这种此消彼长或相互增益的作用方式,导致并不是每一种服务都能同时达到效用最大化,当人为活动继续改变生态系统服务以获取更大的某种特定服务时,毫无疑问会影响其他类型的服务 (Foley *et al.*, 2005)。政府或社会必须根据对不同服务的相对需求偏好制定自然资源管理决策,尽可能使生态系统服务总体效益最大化。因此,深入研究生态系统服务的权衡与协同关系,对促进区域可持续发展以及实现人类福祉、生态系统服务和自然资本管理的“多赢”具有重要意义。

1 生态系统服务及其价值评估

1.1 生态系统服务的内涵与分类

“生态系统服务 (ecosystem services)”最早由 Ehrlich 等 (1981) 在“生态系统功能” (Odum *et al.*, 1971)、“环境服务” (SCEP, 1970)、“全球环境服务” (Holdren *et al.*, 1974) 与“自然服务” (Westman, 1977) 等概念基础上发展而来。但关于生态系统服务的内涵,国内外尚无统一定义。国际上具有代表性的阐述主要有 3 类:一是 Daily (1997) 提出的生态系统服务是自然生态系统及其物种所提供的能够满足和维持人类生活需要的条件和过程;二是 Costanza 等 (1997) 指出生态系统服务是人类直接或间接

地从生态系统功能中所获得的收益;三是 MA (2005) 认为生态系统服务是人类从生态系统获得的全部收益,这与 Costanza 的观点基本一致。我国学者多将上述定义结合使用 (欧阳志云等, 2009; 李双成等, 2013),通常认为生态系统服务是指生态系统所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用,是人类直接或间接地从生态系统中所获得的所有收益。

生态系统为人类生存提供了大量产品和服务 (Lautenbach *et al.*, 2010),社会总是依赖生态系统服务来提升人类福祉。生态系统所提供服务的种类与数量极其庞大, Costanza 等 (1997) 从价值评估角度出发,依据特定生态系统功能,将全球生态系统服务分为 17 种类型,包括气体调节、气候调节、干扰调节、水调节、水供给、控制侵蚀和保持沉积物、土壤形成、养分循环、废物处理、传粉、生物控制、提供避难所、食物生产、原材料、基因资源、休闲和文化等。de Groot 等 (2002) 将其进一步细化为 23 个子类,并归类于调节功能、生境支持功能、供给服务及信息功能等 4 种类型。国内学者如欧阳志云等 (1999) 基于直接价值和间接价值也拟定了对生态系统服务功能的分类方案。目前,国内外应用最为广泛的则为 MA (2005) 提出的分类法,其将服务分为供给服务 (如食物、淡水等)、调节服务 (如气候调节、疾病调节等)、文化服务 (如娱乐和生态旅游、美学欣赏等) 和支持服务 (如土壤形成、养分循环等)。但该分类法也因其未对中间服务、最终服务和收益加以区分,以致不能更好地阐明自然资源管理中的权衡问题而受到一定批判 (Fisher *et al.*, 2008)。

1.2 生态系统服务价值评估

生态系统服务权衡与协同研究的目的是为实现自然资源综合效益最大化,其本质是各类型生态系统服务的关系问题。为深入揭示多种生态系统服务之间的关联关系,首先需要度量生态系统提供各项服务的能力,并基于一定需求偏好对其价值进行评估。生态系统服务价值评估的主要方法包括物质质量评估、价值量评估和能值评估 (赵景柱等, 2000; Boyd *et al.*, 2006; 谢高地等, 2006; Watanabe *et al.*, 2014)。

价值量评估将不同生态系统服务以货币作为统一单位来衡量,评价结果便于公众心理判断,得到广泛应用。生态系统服务价值评估分析框架通常包括 3 部分:测量生态系统服务的供给量、评估生态系统

服务的货币价值以及制定生态系统服务管理决策 (Polasky, 2008)。价值评估中影响最为深远的是 Costanza 等 (1997) 对全球 17 种类型生态系统服务价值化的当量结果, 对各类生态系统服务单位面积的价值进行估算, 最后折算出各生态系统服务总价值。近年, Costanza 等 (2014) 在前述工作基础上又对生态系统服务价值当量进行修正, 利用更新的土地利用数据核算了全球 1997—2011 年的生态系统服务价值变化。国内谢高地等 (2003) 针对 Costanza 研究的数据偏差与不足, 对我国 200 位生态学者进行问卷调查, 制定了我国生态系统服务价值当量表。其后, 国内众多学者在此基础上, 结合研究区实际情况进行参数修正, 形成了针对国家、区域、流域等不同空间尺度及森林、草地、农田、湿地等不同生态系统类型的服务价值评估研究 (崔丽娟, 2004; 赵同谦等, 2004a, 2004b; 傅伯杰等, 2009; 王春连等, 2010; Xie *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2012)。

物质量评估在度量生态系统服务供给能力的空间异质性上具有明显优势, 尤其适合于区域、景观等尺度研究 (黄从红等, 2013; Su *et al.*, 2013), 但由于量纲单位不同, 该方法在比较不同生态系统服务时不如价值量评估和能值评估直观 (赵景柱等, 2000)。能值评估则将各种形式的能量转换为统一单位, 并在解决生态系统服务评估中的重复计算问题上具有一定应用潜力 (李凯等, 2016)。

2 生态系统服务权衡与协同研究进展

2.1 生态系统服务权衡与协同的理论基础

生态系统服务满足人类需求并为人类福祉做出贡献, 是人类生存和发展的基础 (李琰等, 2013), 因此它连接了自然生态系统与社会经济系统, 这就使得生态系统服务权衡与协同必然是一个多学科参与的综合性问题, 涉及地理学、生态学以及经济学、心理学等社会科学。人类社会在发展过程中对福祉的追求和提升遵循着“马斯洛需求层次理论”, 对生态系统服务的偏好优先度由高到低依次为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务 (Foley *et al.*, 2005; Swallow *et al.*, 2009), 在此效用偏好基础上制定的自然资源管理决策一定程度上会加剧供给服务与其他服务间的冲突关系 (戴尔阜等, 2015)。生态系统服务已成为人类福利的重要支撑因素, 从福利经济学视角, 旨在提高人类福利的经济制度 (财政政策、货币政策等)、政治制度 (法律制度、社会保障制度

等)、文化制度 (道德观念、风俗习惯等) 等制度的实施会改变人类利用生态系统的方式和强度, 影响生态系统过程, 从而导致生态系统服务权衡的产生, 并影响人类福利状况 (郑伟等, 2006)。微观经济学中用于权衡生产要素投入与产量关系的生产理论, 可在生态系统服务生产及权衡关系分析中加以应用, 认为管理者做出权衡决策的一个重要原则是要有利于实现生态系统服务对人类福祉提升的持续性和高效率。为更全面理解市场因素对土地利用和生态系统服务的影响, 可借助局部和一般均衡模型来度量价格激励动态、反馈与市场行为的关系 (Werf *et al.*, 2009)。

基于地理学视角, 生态系统服务权衡与协同研究提供了地理学综合研究的核心议题 (李双成等, 2013), 由于涉及到自然系统、人文系统及其耦合, 自然地理学、人文地理学、遥感与地理信息系统等地理学主要分支在其中均可大有作为。为了推动生态系统服务研究的“地理”转向, 李双成等 (2014b) 提议逐步建构起生态系统服务地理学, 并从科学发展背景和社会需求两方面论证了该学科产生的逻辑必然性。所谓生态系统服务地理学, 是以地理学的原理和方法作为指导, 研究生态系统服务形成、传输和使用过程中自然和人文因素相互作用机理, 分析生态系统服务的时空特征和区域差异的地理学应用基础学科 (李双成等, 2014a)。因此, 在基于地理学的权衡与协同研究中, 生态系统服务时空分异性 (Stürck *et al.*, 2015), 生态系统服务供给、受益的区域差异和空间流动 (Serna-Chavez *et al.*, 2014), 多尺度效应综合分析 (Mitchell *et al.*, 2015), 权衡与协同关系的自然和人文驱动因素 (Camhi, 2016) 等, 既是该学科理论基础, 又是主要研究切入点。

生态学, 尤其是生态系统生态学和景观生态学的理论、方法则是生态系统服务权衡与协同研究中的另一重要研究基础。在生态管理与土地利用决策中, 如果能够深刻理解生物多样性与生态系统服务之间的关系 (欧阳志云等, 2009), 及物质流、能流和信息流等生态过程的基础理论, 并充分发挥生态学中结构与功能原理、多样性原理、限制因子原理、渗透性原理等理论与方法的指导作用 (李双成等, 2014a), 则有助于提高生态系统服务权衡决策的有效性和人类福祉的提升。

2.2 生态系统服务权衡与协同的类型

生态系统服务之间的权衡与协同关系产生于人

类做出的管理决策,它能改变生态系统提供的服务类型、量级和其他相关服务(Rodríguez *et al.*, 2006)。生态系统服务的多样性、复杂性及空间不确定性,使得不同生态系统服务间常常相互作用,并且这些服务很难甚至不能同时达到最大利益(Barbier *et al.*, 2008; Tallis *et al.*, 2008)。通常,当一种生态系统服务的供给减少时,引起另外一种生态系统服务增加,就产生了权衡关系;当这几种服务同时增加或减少时,则产生协同作用。掌握生态系统服务权衡与协同关系的类型,是进行可持续生态系统服务管理的基础和前提。

2.2.1 基于时空尺度与可逆性的类型划分 依据不同分析尺度与是否可逆,生态系统服务权衡可分为3种类型:空间上的权衡、时间上的权衡以及可逆性权衡(MA 2005; Rodríguez *et al.*, 2006)。其中,空间上的权衡是指权衡的影响发生在本地还是其他地区,即人们对空间上一个区域某种生态系统服务类型的偏好对其他生态系统服务造成影响,导致它们之间出现此消彼长的现象。例如,对区域中农业粮食供给服务的关注可能会引起水质净化功能的降低,进而影响渔业和水环境游憩价值(Tilman *et al.*, 2002)。时间上的权衡是指这种影响生效的速度,是相对快速的还是慢速的,即现时的生态系统服务利用或损耗对长期的生态系统服务造成的影响。表现为生态系统服务之间的快变化(服务的供给过程)和慢变化(服务的调节过程)的相互作用关系(傅伯杰等 2016),这与人类-自然交互作用及其产生的生态和社会经济结果之间的时间滞后效应有关(Liu *et al.*, 2007)。可逆权衡则是指当停止对已被扰乱的生态系统服务的干扰时,服务恢复到最初状态的可能性。例如,在城市发展过程中,将部分湿地变更为建设用地的开发建设行为,对原有湿地的固碳、蓄水、生物多样性保护以及美学文化等服务造成了不可逆转的影响。值得注意的是,一些权衡过程甚至同时涉及到这3种类型,且随着空间和时间尺度的增大,权衡的不确定性也相应增加。

2.2.2 基于各生态系统服务相互作用的类型划分 根据两两生态系统服务相互作用的曲线特征,可将权衡关系归纳为6种,即无相互作用的服务(non-interacting services)、直接权衡(direct tradeoff)、凸权衡(convex tradeoff)、凹权衡(concave tradeoff)、非单调凹权衡(non-monotonic concave tradeoff)以及倒“S”型权衡(backwards S tradeoff)等

(Lester *et al.*, 2013)。无相互作用的服务是指这些服务是独立不相关的,如两种物种对生境的需求可能不存在重叠。直接权衡,是一种线性权衡关系,在此种关系下管理决策的实施可能使得一种服务供给增加,并致使另一种服务供给减少,但是这种权衡并未降低总收益。凸权衡是指一种服务的供给仅有少量增加,但却损耗了大量的其他服务。凹权衡则是指一种服务的增加并不需要以另一种服务过多的损耗为代价。非单调凹权衡,即一种服务的变化对于另外一种服务有两种可能的效果,在这种权衡中可能有协同作用。倒“S”型权衡则是指在一定范围内一种服务的增加不会减少其他服务,但达到一定阈值后,这种服务的增加会使其他服务迅速降低。此种对各类服务间关系的划分,为评估生态系统服务权衡提供了一种定量方式,该方式不需要将各服务折算成货币单位或其他形式的统一量纲,并能辅助管理者在生态系统管理和生态空间规划中做出有关服务权衡的决策。但需指出的是,上述思路是对真实生态系统服务的简化,一方面仅关注了两两服务间的关系,忽视了多种服务相互作用的复杂过程,而生态管理决策也会同时对多种服务的权衡与协同关系产生影响(Lester *et al.*, 2013),另一方面将多重服务的关系视为静态,未考虑其随时间的变化。因此,如何理解与度量多重服务的关系及其动态演化特征仍有待深入研究。

2.2.3 供给、调节、文化、支持服务的权衡与协同 总体上看,生态系统供给服务与调节、文化、支持等服务之间的权衡关系最为普遍,如食物和纤维生产与水质调节、漫滩景观游憩(Butler *et al.*, 2013),木材生产与渔业养殖(Grasso, 1998),肉类供给与固碳和水源涵养(Pan *et al.*, 2014)之间的权衡。此种权衡关系在农业系统中表现最为明显,农业供给服务在为人类提供食物、纤维、生物质能源等产品时,与水质净化、固碳等调节服务(MA, 2005),及文化服务和生物多样性保护之间存在着权衡关系(Power, 2010)。但Badgley等(2007)对有机农业和全球食物供给的分析表明,如果能够对农田系统采取诸如保护性耕作、作物多样化和集约化、生物控制等措施,则在维持生态系统服务的同时,其粮食产量也不逊于高物质投入的农田系统。说明农业供给服务与其他服务间的权衡关系在可持续管理实践作用下,存在着转为协同关系的可能。此外,不同供给服务之间也具有一定权衡关系,如水产养殖与农业灌溉

(Schlüter *et al.*, 2009) 或水稻生产 (Bhavani *et al.*, 2004) 之间的冲突。至于协同关系,则在调节、文化、支持服务之间表现得更为明显 (李鹏等, 2012), 如径流调节与土壤保持 (Egoh *et al.*, 2009), 土壤有机碳和总氮 (Lu *et al.*, 2014), 水质调节与娱乐休憩价值 (Butler *et al.*, 2013) 等。

然而,由于景观异质性及生态系统利用与管理方式等条件的不同,生态系统服务之间的关系具有区域差异性。如对于固碳与淡水供给,Chisholm (2010) 对南非红客沙谷的研究认为造林带来的固碳效应有助于应对气候变化,但却对淡水供给产生了负效应,即二者存在权衡关系,而 Bai 等 (2011) 等对白洋淀流域的研究则发现二者存在协同关系。因此,在研究权衡与协同关系时,需明确特定空间尺度,以便制定科学合理的生态管理决策。更进一步地,虽然当前针对生态系统服务权衡与协同关系类型的辨识已有大量工作,但各服务间权衡与协同的曲线特征 (如线性和非线性)、阈值或拐点、数量模型等仍亟待深入研究。

2.3 生态系统服务权衡与协同的研究方法

2.3.1 生态-经济综合模型 可持续资源管理要求决策者深入理解复杂生态过程和塑造人类-自然交互作用关系的社会经济驱动力 (Byron *et al.*, 2015)。所谓生态-经济综合模型是一系列生态模型和社会经济模型的组合。其中,生态模型用以量化不同管理决策下生态系统过程和结构变化带来的生态系统服务变化。社会经济模型则反映生态系统服务变化对人类福祉或收益的影响。生态-经济综合模型为掌握资源有限条件下生态与经济系统的相互联系,并辅助权衡决策制定提供了便利。如为评判“增加沿海湿地面积、减少水产养殖”这一政策的优劣,可模拟并比较政策实施后因抵御风暴所避免的财产损失,与相应渔业空间减小所降低的经济收入的大小 (Farber *et al.*, 2006)。国外学者基于生态-经济综合模型开展了大量应用分析,而国内鲜有此类研究。如 Hussain 等 (2013) 基于一般均衡生态系统模型 (GEEM) 和种群增长曲线建立生态-经济综合模型,分析了生物多样性保护与两种可市场化的生态系统服务 (放牧和打猎) 之间的权衡关系。Chisholm (2010) 构建了动态生态-经济综合模型,分析了南非高山硬叶灌木群落种植辐射松在经济上是否可行,其衡量标准是种植辐射松在固碳、木材生产上的潜在收益是否高于水资源供给的损失。总体上,生态-

经济综合模型多用于分析诸如木材生产、食物供给等便于市场化的服务与生物多样性保护、固碳价值等之间的权衡,为制定有利于平衡经济活动与维持生态系统服务的政策提供了有力工具。但在研究更偏重于“公共物品”的土壤保持、光合作用、传粉等服务间的权衡与协同关系时具有明显劣势。此外,如果能将时空异质性考虑在内,则模型分析结果将更为接近真实 (Hussain *et al.*, 2013)。

2.3.2 统计学方法 生态系统服务权衡与协同研究中常用的统计学方法包括相关性分析、回归分析、聚类分析、冗余分析等 (戴尔阜等, 2016)。相关性分析是一个辨识生态系统服务权衡与协同类型及程度的简单有效方法。如 Wu 等 (2013) 利用 Spearman 秩相关方法分析了北京及周边区域物质生产、碳存储、土壤保持、生境保护、居住空间等两两服务间的关系。回归分析则可进一步探究权衡与协同的影响因素,如 Maes 等 (2012) 基于多元 Logistic 回归研究了生态系统服务、生物多样性与栖息地保护之间的权衡与协同关系,而 Dobbs 等 (2014) 则探讨了城市植被生态系统服务间的权衡与协同关系,并借助贝叶斯回归分析了政府管制、社会发展及气候对生态系统服务的影响。基于聚类分析和冗余分析的“生态系统服务簇”在识别权衡与协同关系时,强调了生态系统服务间相互联系的内在本质及与之相关的社会-生态驱动力 (Yang *et al.*, 2015), 有助于提高权衡管理决策的针对性和工作效率 (戴尔阜等, 2016)。如 Raudsepp-Hearne 等 (2010) 通过分析研究区 12 项生态系统服务的空间格局,发现所识别出的 6 组生态系统服务簇能较好地对应景观中社会-生态系统明显不同的区域。总体上,统计学方法在识别权衡与协同类型及其影响因素方面应用较为成熟,但其分析结果也容易受到样本数量及其采集方式的影响。

2.3.3 多目标决策分析 生态系统服务权衡与协同问题往往涉及到多方利益主体,其各自目标和价值判断在很大程度上是冲突的,为使得各方利益最大化,常需要对多个解决方案进行权衡和比较,而非简单的单一目标最优解问题 (Bekele *et al.*, 2005)。多目标决策分析 (MCDA) 允许设定多个目标函数,并通过分配可调整的权重形成总效用函数,以总效用最大化为标准对各方案进行排序,从而尽可能使各方利益达到“帕累托最优”。Hurford 等 (2014) 结合水资源管理模拟模型与多目标搜索算法,设定包

括水资源供给和灌溉、水力发电、生态系统服务维护在内的 8 项目标,权衡了肯尼亚塔纳河流域不同水坝投资管理方案,并进行了图形表达。Hu 等(2015)基于生态评估模型和多目标空间优化模型构建了 SAORES 决策支持工具,用以生态系统管理和规划设计,并分析了黄土高原燕沟流域生态系统服务的权衡关系。蒙吉军等(2012)综合社会经济发展条件、未来发展目标和水资源、土壤侵蚀等生态约束,以生态和社会效益最大化为目标,基于多目标优化模型构建了鄂尔多斯市土地利用生态安全格局。总体上,多目标决策分析为生态系统服务与生态管理规划之间的衔接搭建了桥梁,能够辅助政策制定者和规划师协调各利益方之间的博弈,确定出总效用最大的规划方案或政策设计。这一方法的使用需要建立在多方参与基础上,以提高方案评判和决策过程中的公平性(Sanon *et al.*, 2012)。此外,由于目标设定、权重分配等,多目标决策分析容易具有不确定性,对优化结果造成较大影响(Schwenk *et al.*, 2012)。

2.3.4 生态系统服务制图 生态系统服务制图是研究者根据决策需求,通过 GIS 平台的制图功能与空间叠加、地图代数等方法对每种生态系统服务类型进行空间制图和空间重合度比较。在空间制图基础上,通常会进一步结合空间自相关、冷热点分析、玫瑰图等以刻画特定时空尺度上生态系统服务的空间格局及权衡与协同关系。如刘玉等(2015)基于全局和局部空间自相关分析了京津冀县域农产品生产功能的时空格局和空间耦合性。Qiu 等(2013)对美国某城市化流域地区 10 种生态系统服务进行空间制图和冷热点分析,并进一步利用因子分析等方法探讨了多重生态系统服务的空间格局、权衡与协同关系。杨晓楠等(2015)对关中—天水经济区固碳、保水及土壤保护等生态系统服务进行了制图,并引入玫瑰图分析了耕地、林地、草地景观中各服务间的权衡与协同关系。此外,生态系统服务供给区、受益区在空间上可能并不匹配,服务的空间流动近年来得到越来越多关注(Serna-Chavez *et al.*, 2014),可通过分别对其进行空间制图并叠加,识别出全球非空间位置依存服务、局部空间位置依存服务、与方向相关的服务、原位服务和与用户迁移有关的服务等类型(Costanza, 2008)。但服务空间流动路径及其速率和通量目前仍是研究的重大挑战之一,需要借助特定的生态过程数据建立流动路径算法(李双成

等 2014a)。总体上,生态系统服务制图在基于土地利用/土地覆被的权衡与协同研究中起到基础性作用,是一种简单、有效、直观且空间位置信息明确的可视化方法。需注意的是,对土壤储水量、水质净化等服务进行制图后应以实测数据加以验证。此外,生态系统服务制图通常要与其他方法相结合,以更好地支持资源管理决策和生态规划实践。

2.3.5 情景模拟法 情景是对未来社会经济发展、生态管理等方面可能性的模拟,而土地所具有的生产-生活-生态多重功能,使得上述可能性最终都可对应于一定土地利用/土地覆被格局。权衡与协同研究中的情景模拟法常通过设定生态保护优先、经济发展优先等不同目标,模拟相应土地利用/土地覆被情景,并在此基础上评估生态系统服务,以便决策者了解区域内生态系统服务在当前或者未来各种因素影响下的变化,以及在可能的决策规划情景下各服务呈现的权衡或协同关系(张立伟等 2014)。其中,CLUE-S、元胞自动机、多智能体、土地系统动态模拟(DLS)是常用的土地利用情景模拟方法。Reed 等(2013)基于访谈和实地走访,综合考虑了决策制定者和其他相关方利益,构建了粗放型和集约型土地利用管理政策情景,并分析其对生态系统服务权衡关系的影响。Meehan 等(2013)研究了分别种植一年生能源作物和多年生能源作物情景下,作物供给、土地经济收益和其他 5 种生态系统服务间的权衡或协同关系,结果表明多年生能源作物的引入可提升多种生态系统服务惠益,但也会对生产者和土地所有者经济收益产生负效应。总体上,情景模拟法适于分析不同时空尺度上土地利用/土地覆被变化、政策调整、规划变更等引起的生态系统服务及其关系变化,有利于揭示未来不同发展目标导向下的生态-经济-社会收益和机会成本大小,为生态系统服务权衡提供决策支持,并可用来指导土地规划和生态系统管理实践中有关未来发展战略的构想。但在应用该方法时应注意提高所模拟情景的合理性,在加强对区域发展本底条件、不同利益方生态系统服务选择偏好等研究的基础上,结合计算机模拟模型,预测未来发展状态和管理模式的可能变化,以提高权衡与协同决策的有效性。

基于情景模拟的生态系统服务权衡与协同分析中,应用最为广泛的是斯坦福大学、大自然保护协会(TNC)与世界自然基金会(WWF)在自然资本项目资助下联合开发的生态系统服务综合评估与权衡模

型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST)。该模型基于 GIS 平台,可对一系列陆地和海洋生态系统服务进行制图和评估 (Tallis *et al.* 2013),并能够根据研究需要设定不同的情景框架,从不同时空尺度上权衡各情境下生态系统服务变化,为自然资本管理提供参考。自 InVEST 模型发布以来,国内外学者综合情景分析和 InVEST 模型,在不同地区开展了大量生态系统服务权衡与协同研究。Nelson 等 (2009) 利用 InVEST 模型分析了美国俄勒冈州威拉米特盆地 3 种土地利用与覆被变化情景 (开发情景、保护情景和规划情景) 下,生态系统服务、生物多样性与商品产量供给之间的权衡关系。Swetnam 等 (2011) 和 Fisher 等 (2011) 利用 InVEST 模型对坦桑尼亚东部弧形山脉的生态系统服务进行度量、模拟和制图,在利益相关者共同参与下构建了两个社会-经济情景,分析了“期望情景”和“一切照常情景”下生态系统服务权衡与协同关系以及不同尺度下生态系统服务与人类福祉的关联。在国内, Bai 等 (2013) 在 InVEST 模型支持下分析了白洋淀地区 5 种情景 (无农用地转换、无城市扩张、农业扩张、林业扩张和河岸再造林) 农业生产、水电生产和水质保护等服务的权衡与协同关系。

3 展 望

3.1 丰富权衡与协同理论基础,建构多学科综合研究体系

生态系统服务作为连接生态系统与人类福祉的桥梁,涉及到自然生态系统、经济系统、社会系统及其相互联系、相互作用的复杂关系,这使得生态系统服务间权衡与协同的关系问题必然是一个自然科学与社会科学交叉的综合性研究议题。目前,生态系统服务权衡与协同的理论基础主要源于地理学和生态学等自然科学,对于以经济学为主要代表的社会科学理论的引入相对不够完善和成体系化。生态系统服务作为人类福祉在自然生态系统中的惠益,是一种可以市场化或货币化的产品和服务,目前基于经济学市场理论的生态系统服务价值评估已较为成熟,但在生态系统服务权衡与协同关系刻画上还需进一步加强对经济学等社会科学理论的引入和应用,包括供需理论、市场均衡理论、输入输出模型、生产理论等,探讨有利于实现帕累托最优的生态管理策略选择问题。同时,社会科学理论的引入也要加强与地理学、生态学理论的衔接,充分发挥各学科优

势,构建多学科交叉的“生态过程-服务-权衡与协同-人类福祉”的综合研究框架。

3.2 完善生态系统服务分类体系,量化权衡与协同非线性特征

自生态系统服务内涵得到广泛认识以来,国内外学者根据不同研究目的,从服务对人类福祉的贡献、服务的经济价值核算、服务的空间流动、服务的通用分类等 (李琰等, 2013) 多个生态系统服务特征入手,形成了多种服务分类方案。然而,即便是当前认同度最高的 MA 所提出的供给、调节、文化、支持服务四分法也存在一定问题。由于未能区分中间服务和终端服务,该分类方案难免对生态系统服务有所重复或遗漏,并对服务价值估算造成影响 (Fisher *et al.* 2008)。一个区分度高且指向明确的生态系统服务分类体系是服务价值核算和权衡与协同关系识别的前提和基础依据。今后在进一步完善针对生态系统服务权衡与协同研究目的的服务分类体系时,也应加深对生态过程与生态系统服务二者非一一对应关系的认识,并将人类福祉作为导向嵌入服务分类过程。在此基础上,加强生态系统服务权衡与协同的定量分析,引入复杂性科学等方法对服务间非线性关系进行系统分析。目前研究中主要采用的相关、聚类、空间叠加等方法视各服务间关系为线性,忽视了生态系统非线性特征所带来的不确定性。对生态系统服务非线性权衡或协同关系的刻画,有助于识别生态系统服务变化的过程和阈值,为区域生态目标调控提供基础参考。

3.3 刻画生态系统服务空间流动,加强权衡与协同跨时空集成

虽然特定时空尺度上生态系统服务供给区、受益区在空间上的不一致及其空间流动问题逐渐引起学者注意,但总体上此类研究仍处于初级阶段,尚有较多问题亟待解决。一方面,研究多停留于静态生态系统服务制图层面,且相对于服务供给而言,服务需求制图仍需进一步深入。随着遥感技术的快速发展,多时相、全覆盖遥感影像的应用使得大尺度生态系统服务动态监测成为可能。对服务供给和服务需求制图进行长时间序列研究,识别服务“源”、“汇”区域空间分异性的动态演化规律成为一大研究重点。另一方面,供给区和受益区之间服务的空间流动与模拟研究仍较薄弱。需要深入研究服务空间流动的速度、方向和路径,结合特定生态过程数据 (李双成等, 2014a),借助服务路径属性网络 (SPAN)、

最短路径等算法模拟生态系统服务空间流动网络。此外,生态系统服务权衡与协同研究最终是为区域可持续发展服务的,这需要对具有复杂关系的服务项进行跨时间、跨区域集成。基于对生态过程-生态功能-生态系统服务关系的认识,结合实测数据和模型模拟,在多种时空尺度上、多种区域间、多种生态系统内探索不同生态系统服务的关系并进行优化,是近期权衡与协同研究的重点。

3.4 系统化揭示权衡与协同机理,推动成果在国土领域的应用

厘清生态系统服务权衡与协同关系的时空分异性、曲线特征等是把握服务间关系的基础,而更进一步的则是对其形成机理、驱动机制的系统化揭示。生态系统服务为何产生权衡与协同关系?其权衡与协同关系为何具有非线性特征?气候变化、土地利用/土地覆被变化与人类活动等外在条件以及生态结构、过程与功能等内在因子如何对权衡与协同关系产生影响?不同时空尺度下,权衡与协同关系可能发生变化的原因是什么?上述问题是在生态系统服务权衡与协同形成与驱动机理中迫切需要回答的问题。在对上述研究议题进行探索时,应注意推广权衡与协同研究成果在国土、生态等与可持续发展密切相关领域中的应用,如在生态补偿机制建立中,权衡与协同研究可以回答诸如该对何种对象进行补偿、在什么区域开展补偿、补偿形式如何等一系列问题。再如对于土地利用规划编制和生态红线划定,权衡与协同研究可有效识别对维持区域生态系统服务至关重要、需重点保护的生态空间,并辅助构建能最大限度规避生态风险、保障生态安全的国土安全格局。

参考文献

崔丽娟. 2004. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究. *生态学杂志*, **23**(4): 47-51.

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. *地球科学进展*, **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. *地理研究*, **35**(6): 1005-1016.

傅伯杰, 于丹丹. 2016. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, **38**(1): 1-9.

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. *地球科学进展*, **24**(6): 571-576.

黄从红, 杨军, 张文娟. 2013. 生态系统服务功能评估模型研究进展. *生态学杂志*, **32**(12): 3360-3367.

李凯, 崔丽娟, 李伟, 等. 2016. 基于能值代数的湿地

生态系统服务评价去重复性计算. *生态学杂志*, **35**(4): 1108-1116.

李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等. 2012. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, **32**(16): 5219-5229.

李琰, 李双成, 高阳, 等. 2013. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架. *地理学报*, **68**(8): 1038-1047.

李双成, 马程, 王阳, 等. 2014a. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社.

李双成, 王珏, 朱文博, 等. 2014b. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. *地理学报*, **69**(11): 1628-1639.

李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 2013. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, **32**(8): 1379-1390.

刘玉, 唐林楠, 潘瑜春, 等. 2015. 京津冀地区县域农产品生产功能的时空格局及耦合特征. *农业工程学报*, **31**(16): 305-314.

蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 2012. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. *生态学报*, **32**(21): 6755-6766.

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. *生态学报*, **19**(5): 19-25.

欧阳志云, 郑华. 2009. 生态系统服务的生态学机制研究进展. *生态学报*, **29**(11): 6183-6188.

王春连, 张锦镗, 王兆锋, 等. 2010. 拉萨河流域湿地生态系统服务功能价值变化. *资源科学*, **32**(10): 2038-2044.

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. *植物生态学报*, **30**(2): 191-199.

谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 2003. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, **18**(2): 189-196.

杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 等. 2015. 关中-天水经济区生态系统服务的权衡关系. *地理学报*, **70**(11): 1762-1773.

张立伟, 傅伯杰. 2014. 生态系统服务制图研究进展. *生态学报*, **34**(2): 316-325.

赵景柱, 肖寒, 吴刚. 2000. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析. *应用生态学报*, **11**(2): 290-292.

赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 2004a. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. *生态学报*, **24**(6): 1101-1110.

赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 2004b. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *自然资源学报*, **19**(4): 480-491.

郑伟, 石洪华, 陈尚, 等. 2006. 从福利经济学的角度看生态系统服务功能. *生态经济*, (6): 78-81.

Badgley C, Moghtader J, Quintero E, et al. 2007. Organic agriculture and the global food supply. *Renewable Agriculture and Food Systems*, **22**: 86-108.

Bai Y, Zheng H, Ouyang ZY, et al. 2013. Modeling hydrological ecosystem services and tradeoffs: A case study in Baiyangdian watershed, China. *Environmental Earth Sciences*, **70**: 709-718.

Bai Y, Zhuang CW, Ouyang ZY, et al. 2011. Spatial characteristics between biodiversity and ecosystem services in a human-dominated watershed. *Ecological Complexity*, **8**: 177-183.

Barbier EB, Koch EW, Silliman BR, et al. 2008. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological func-

- tions and values. *Science*, **319**: 321 – 323.
- Bekele EG, Nicklow JW. 2005. Multiobjective management of ecosystem services by integrative watershed modeling and evolutionary algorithms. *Water Resources Research*, **41**: W10406.
- Bhavani S, Ashley H, Julian B. 2004. Rice versus fish revisited: On the integrated management of floodplain resources in Bangladesh. *Natural Resources Forum*, **28**: 91 – 101.
- Boyd J, Banzhaf S. 2006. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *SS-RN Electronic Journal*, **63**: 616 – 626.
- Brauman KA, Daily GC, Duarte TKE, et al. 2007. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Social Science Electronic Publishing*, **32**: 67 – 98.
- Butler JRA, Wong GY, Metcalfe DJ, et al. 2013. An analysis of trade-offs between multiple ecosystem services and stakeholders linked to land use and water quality management in the Great Barrier Reef, Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **180**: 176 – 191.
- Byron CJ, Jin D, Dalton TM. 2015. An Integrated ecological-economic modeling framework for the sustainable management of oyster farming. *Aquaculture*, **447**: 15 – 22.
- Camhi AL. 2016. Tradeoffs and compatibilities among ecosystem services: Biological, physical and economic drivers of multifunctionality. *Advances in Ecological Research*, **54**: 207 – 243.
- Chisholm RA. 2010. Trade-offs between ecosystem services: Water and carbon in a biodiversity hotspot. *Ecological Economics*, **69**: 1973 – 1987.
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**: 253 – 260.
- Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, **26**: 152 – 158.
- Costanza R. 2008. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, **141**: 350 – 352.
- Daily GC. 1997. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press: 220 – 221.
- de Groot RS, Wilson MA, Boumans RM. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, **41**: 393 – 408.
- Dobbs C, Nitschke CR, Kendal D. 2014. Global drivers and tradeoffs of three urban vegetation ecosystem services. *PLoS ONE*, **9**: e113000.
- Egoh B, Reyers B, Rouget M, et al. 2009. Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in South Africa. *Biological Conservation*, **142**: 553 – 562.
- Ehrlich PR, Ehrlich AH. 1981. *Extinction: The Causes and Consequences of the Disappearance of Species*. New York: Random House.
- Farber S, Costanza R, Childers DL, et al. 2006. Linking ecology and economics for ecosystem management. *Bioscience*, **56**: 117 – 129.
- Fisher B, Turner RK, Burgess ND, et al. 2011. Measuring, modeling and mapping ecosystem services in the Eastern Arc Mountains of Tanzania. *Progress in Physical Geography*, **35**: 595 – 611.
- Fisher B, Turner RK. 2008. Ecosystem services: Classification for valuation. *Biological Conservation*, **141**: 1167 – 1169.
- Foley JA, Defries R, Asner GP, et al. 2005. Global consequences of land use. *Science*, **309**: 570 – 574.
- Fu BJ, Wang S, Su CH, et al. 2013. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **5**: 4 – 10.
- Grasso M. 1998. Ecological-economic model for optimal mangrove trade off between forestry and fishery production: Comparing a dynamic optimization and a simulation model. *Ecological Modelling*, **112**: 131 – 150.
- Holdren JP, Ehrlich PR. 1974. Human population and the global environment. *American Scientist*, **62**: 282 – 292.
- Hu HT, Fu BJ, Lu YH, et al. 2015. SAORES: A spatially explicit assessment and optimization tool for regional ecosystem services. *Landscape Ecology*, **30**: 547 – 560.
- Hurford AP, Harou JJ. 2014. Balancing ecosystem services with energy and food security: Assessing trade-offs from reservoir operation and irrigation investments in Kenya's Tana Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, **18**: 3259 – 3277.
- Hussain AMT, Tschirhart J. 2013. Economic/ecological tradeoffs among ecosystem services and biodiversity conservation. *Ecological Economics*, **93**: 116 – 127.
- Lautenbach S, Volk M, Gruber B, et al. 2010. Quantifying ecosystem service trade-offs// International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake. Ottawa, Canada: 5 – 8.
- Lester SE, Costello C, Halpern BS, et al. 2013. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning. *Marine Policy*, **38**: 80 – 89.
- Liu JG, Dietz T, Carpenter SR, et al. 2007. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, **317**: 1513 – 1516.
- Liu Y, Li JC, Zhang H. 2012. An ecosystem service valuation of land use change in Taiyuan City, China. *Ecological Modelling*, **225**: 127 – 132.
- Lu N, Fu BJ, Jin TT, et al. 2014. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes. *Landscape Ecology*, **29**: 1697 – 1708.
- MA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington, DC: Island Press.
- Maes J, Paracchini ML, Zulian G, et al. 2012. Synergies and trade-offs between ecosystem service supply, biodiversity, and habitat conservation status in Europe. *Biological Conservation*, **155**: 1 – 12.
- Meehan TD, Gratton C, Diehl E, et al. 2013. Ecosystem-service tradeoffs associated with switching from annual to perennial energy crops in riparian zones of the US Midwest. *PLoS ONE*, **8**: e80093.
- Mitchell MGE, Bennett EM, Gonzalez A. 2015. Strong and nonlinear effects of fragmentation on ecosystem service provision at multiple scales. *Environmental Research Letters*, **10**: 94014.

- Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **7**: 4 – 11.
- Nelson E, Polasky S, Lewis DJ, et al. 2008. Efficiency of incentives to jointly increase carbon sequestration and species conservation on a landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**: 9471 – 9476.
- Odum EP, Barrett GW. 1971. *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia: Saunders.
- Pan Y, Wu JX, Xu ZR. 2014. Analysis of the tradeoffs between provisioning and regulating services from the perspective of varied share of net primary production in an alpine grassland ecosystem. *Ecological Complexity*, **17**: 79 – 86.
- Polasky S. 2008. What's nature done for you lately: Measuring the value of ecosystem services. *Comparative Biochemistry & Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, **119**: 469 – 476.
- Power AG. 2010. Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **365**: 2959 – 2971.
- Qiu J, Turner MG. 2013. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**: 12149 – 12154.
- Raudsepp-Hearne C, Peterson GD, Bennett EM. 2010. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**: 5242 – 5247.
- Reed MS, Hubacek K, Bonn A, et al. 2013. Anticipating and managing future trade-offs and complementarities between ecosystem services. *Ecology and Society*, **18**: 469 – 476.
- Rodríguez JP, Beard TD, Bennett EM, et al. 2006. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, **11**: 709 – 723.
- Sanon S, Hein T, Douven W, et al. 2012. Quantifying ecosystem service trade-offs: The case of an urban floodplain in Vienna, Austria. *Journal of Environmental Management*, **111**: 159 – 172.
- SCEP. 1970. *Man's Impact on the Global Environment*. Massachusetts: MIT Press.
- Schlüter M, Leslie H, Levin S. 2009. Managing water-use trade-offs in a semi-arid river delta to sustain multiple ecosystem services: A modeling approach. *Ecological Research*, **24**: 491 – 503.
- Schwenk WS, Donovan TM, Keeton WS, et al. 2012. Carbon storage, timber production, and biodiversity: Comparing ecosystem services with multi-criteria decision analysis. *Ecological Applications*, **22**: 1612 – 1627.
- Serna-Chavez HM, Schulp CJE, Bodegom PMV, et al. 2014. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, **39**: 24 – 33.
- Smith P, Orr HG. 2012. The role of ecosystems and their management in regulating climate, and soil, water and air quality. *Journal of Applied Ecology*, **50**: 812 – 829.
- Stürck J, Schulp CJE, Verburg PH. 2015. Spatio-temporal dynamics of regulating ecosystem services in Europe: The role of past and future land use change. *Applied Geography*, **63**: 121 – 135.
- Su CH, Fu BJ. 2013. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global & Planetary Change*, **101**: 119 – 128.
- Swallow BM, Sang JK, Nyabenge M, et al. 2009. Tradeoffs, synergies and traps among ecosystem services in the Lake Victoria basin of East Africa. *Environmental Science & Policy*, **12**: 504 – 519.
- Swetnam RD, Fisher B, Mbilinyi BP, et al. 2011. Mapping socio-economic scenarios of land cover change: A GIS method to enable ecosystem service modelling. *Journal of Environmental Management*, **92**: 563 – 574.
- Tallis H, Chang A. 2008. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**: 9457 – 9464.
- Tallis H, Ricketts T, Guerry AD, et al. 2013. InVEST 2.6.0 User's Guide: Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs. Stanford: The Natural Capital Project.
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, et al. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, **418**: 671 – 677.
- Vidal-Legaz B, Martínez-Fernández J, Picón AS, et al. 2013. Trade-offs between maintenance of ecosystem services and socio-economic development in rural mountainous communities in southern Spain: A dynamic simulation approach. *Journal of Environmental Management*, **131**: 280 – 297.
- Watanabe MDB, Ortega E. 2014. Dynamic emergy accounting of water and carbon ecosystem services: A model to simulate the impacts of land-use change. *Ecological Modelling*, **271**: 113 – 131.
- Werf EVD, Peterson S. 2009. Modeling linkages between climate policy and land use: An overview. *Agricultural Economics*, **40**: 507 – 517.
- Westman WE. 1977. How much are nature's services worth? *Science*, **197**: 960 – 964.
- Wu JS, Feng Z, Gao Y, et al. 2013. Hotspot and relationship identification in multiple landscape services: A case study on an area with intensive human activities. *Ecological Indicators*, **29**: 529 – 537.
- Xie GD, Li WH, Xiao Y, et al. 2010. Forest ecosystem services and their values in Beijing. *Chinese Geographical Science*, **20**: 51 – 58.
- Yang GF, Ge Y, Xue H, et al. 2015. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes. *Landscape and Urban Planning*, **136**: 110 – 121.

作者简介 曹祺文,男,1992年生,硕士研究生,研究方向为土地科学和景观生态学。E-mail: cqwgufeng@pku.edu.cn
责任编辑 李凤芹
