

DOI: 10.5846/stxb201504030668

张琨, 吕一河, 傅伯杰. 生态恢复中生态系统服务的演变: 趋势、过程与评估. 生态学报, 2016, 36(20): - .

Zhang K, Lü Y H, Fu B J. Ecosystem service evolution in ecological restoration: trend, process, and evaluation. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): - .

生态恢复中生态系统服务的演变: 趋势、过程与评估

张 琨, 吕一河*, 傅伯杰

中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 经过十余年的发展, 生态系统服务已经成为生态恢复研究关注的前沿和热点。生态恢复改变了生态系统格局与过程, 对生态系统服务的产生和提供具有重要影响。但是目前对于生态系统服务在生态恢复过程中的演化仍缺少系统性研究。对国内外相关研究的最新成果进行综述, 总结了生态系统服务评估中框架的构建和方法的选择(参数转移法、系统模型法和定量指标法), 介绍了生态恢复对生态系统服务的促进作用、生态系统服务的演变过程以及不同生态系统服务间的协同与权衡关系, 分析了社会经济因素对生态恢复和生态系统服务维持的影响。最后结合我国生态恢复实践, 提出未来生态恢复和生态系统服务研究可以从深化作用机制研究、推动服务评估创新、增强研究成果应用三方面深化和拓展。

关键词: 生态系统; 生态恢复; 生态系统服务; 生态系统服务评估

Ecosystem service evolution in ecological restoration: trend, process, and evaluation

ZHANG Kun, LÜ Yihe*, FU Bojie

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment Science, Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China

Abstract: Ecosystems provide essential goods and services to human society, such as food, water, soil retention, and carbon sequestration, which lay the foundations for human well-being. An increase in the scale and intensity of human activity alters the ecosystem services' supply and demand pattern, and this can lead to ecological degradation. Ecological restoration has been widely regarded as an effective approach for mitigating ecological degradation and improving ecosystem services supply. Over the past few years, ecosystem service research has become an important topic in ecological restoration. Ecological restoration can change ecosystem composition, structure, and processes, which affects the provision and delivery capability of ecosystem services. However, the effects on ecosystem service evolution during ecological restoration have not been systematically researched. This review analyzes the ecosystem services evolution in ecological restoration practices based on new advances in ecological restoration and ecosystem services. Framework establishment and method choosing (including parameter transfer, systematic modeling, and quantitative, indicator-based estimation) have significant influences on ecosystem service evaluation. There is evidence that ecological restoration has positive impacts on ecosystem service increases, but the processes involved are relatively complicated. In the ecological restoration process, a trade-off and synergy interrelationship exists between different types of ecosystem service. Socio-economic factors, especially the attitudes and choices of stakeholders, may affect ecosystem service maintenance. Over the past decade, the Chinese government has implemented a series of ecological restoration projects to alleviate ecosystem degradation. The ecological restoration projects play important roles in environment protection and ecological improvement. After taking into

基金项目: 环保公益性行业专项(201409055); 中国科学院科技促进发展项目(KFJ-EW-STS-021-03)

收稿日期: 2015-04-03; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyh@cees.ac.cn

consideration present ecological restoration implementation practices in China, future research into ecological restoration and ecosystem service should aim to improve (1) the understanding of the production and delivery mechanisms underlying ecosystem services; (2) the innovation in framework establishment and method of ecosystem service evaluation; and (3) the application of research findings to ecological restoration practice and environment management.

Key Words: ecosystem; ecosystem restoration; ecosystem service; ecosystem service evaluation

生态系统服务指人类从生态系统中获取的利益,包括支持服务、供给服务、调节服务和文化服务四类,是人类社会赖以维持和发展的重要基础^[1-6]。随着人口规模的增加和社会经济的发展,资源需求大幅上升,生态系统的开发强度不断升级。长时间高强度的开发导致生态系统退化现象出现,表现为水土流失、植被退化、水体污染等。生态退化使得生态系统服务出现恶化和退化。联合国千年生态系统评估计划(Millennium Ecosystem Assessment, MA)在报告中指出,在其评估的24项全球生态系统服务功能中,有15项处于退化或不可持续利用的状态^[6]。生态系统服务的丧失对人类福祉产生严重影响,并对区域乃至全球生态安全构成直接威胁^[7-8]。生态恢复是通过人为干预,启动或促进退化生态系统恢复进程的活动,被认为是应对生态退化,改善生态系统服务的有效手段。近年来,生态系统服务逐渐成为生态恢复的焦点^[9-10],受到广泛关注。2010年,生物多样性公约缔约方大会在《2011—2020年生物多样性战略计划》明确提出,到2020年,对产生重要服务的生态系统给予恢复和保障,恢复至少15%的退化生态系统,增强碳存储能力(目标14和15)。2012年,在联合国环境规划署的主导之下,生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)正式由联合国批准成立。IPBES的成立将进一步推动生态恢复过程中生态系统服务演变机制的探索,加强科学和政策间的互动,促进科学研究向管理实践的转化(<http://www.ipbes.net>)。本文通过综合国内外关于生态恢复以及生态系统服务的最新研究进展,对生态恢复中生态系统服务演变的趋势、过程以及评估进行评述,以期对相关研究及规划管理提供理论参考。

1 生态系统服务评估

1.1 评估框架

构建合理框架对生态系统服务进行评估是生态恢复中生态系统服务演变分析的基础。生态恢复过程是人为和自然共同作用下的演替过程,其间产生的生态系统服务类型多样,同时各服务通过生态过程产生联系,表现出非独立且非线性的特点^[11]。服务间的联系使得服务评估过程中产生种种问题,重复计算(double counting)现象即为其中典型。

重复计算现象指在多个生态系统服务间存在重叠的情况下,对单项服务分别评估并直接相加,导致重叠部分被多次统计的现象。重复计算会增加评估结果的不确定性和不可信性。目前学者对如何在评估框架中减少重复计算进行了探讨,如Trabucchi等指出在生态系统服务分类过程中将过程与服务相混杂,分类结果无法为决策者所用,并导致潜在重复计算的发生^[12];傅伯杰等进一步归纳指出,造成重复计算的原因包括生态系统服务分类不清晰、生态系统复杂性理解不到位、各项服务之间的互补性和排它性认识不充分、忽略时空尺度依赖性以及评价方法选择不当,而减少重复计算则需要在框架构建过程中注意①判明生态系统服务时空尺度,②衡量生态系统服务提供的最终收益,③构建明确的生态系统服务分类体系,④选择与研究内容相契合的评价方法^[13]。

随着研究的深入,通过生态系统服务管理实现可持续发展目标的观点受到越来越广泛的认同,对生态系统服务评估结果的应用性和实践性关注不断提高^[14-16]。要满足管理者的实际需求,就需要解决生态系统要素与服务之间的数据空缺(data gap)。对此,Wong等提出利用生物物理模型评估生态系统要素、基于末端受益识别最终服务、利用生态生产功能(ecological production functions)作为二者联系的桥梁,明确服务间的权衡

关系,并基于该理论提出了由十个步骤构成的评估框架。框架分为两个阶段,阶段一包括人类福祉识别、生态系统最终服务识别、生态系统最终服务指标确定、生态系统特征指标确定 4 个步骤;阶段二则包括生态系统最终服务指标评价、生态系统特征指标评价、生态生产功能评价、生态系统服务权衡与协同评价、生态系统服务制图、情景模拟 6 个步骤^[17]。

1.2 评估方法

目前生态系统服务评估方法大致可分为 3 类:参数转移法、系统模型法以及定量指标法。参数转移法是在空间大尺度上进行生态系统服务评估的常用方法。该方法是利用生态系统服务价值参数以及空间变化特征^[18],根据相似区域评估结果计算研究区服务价值^[19]或根据小区域评估结果估算大区域价值总量^[20],即包括横向的参数转移和纵向的尺度上推。受到数据可达性的制约,在应用中价值参数多通过相关文献的 meta 分析获取,空间变化特征则通过土地利用数据表达。由于参数转移法是基于经验模型而来,因此存在着忽略空间异质性、生态系统服务实现机制分析不足等问题。系统模型法是从生态系统服务产生的基础出发,整合生态学、地理学、经济学等多学科知识形成的系统评估方法。发展至今,开发并投入应用的评估模型已达到 17 种,主要包括 INVEST 模型、ARISE 模型、MIMES 模型等^[21]。各模型中应用最广泛、认可度最高的为生态系统服务及权衡综合评估模型(INVEST 模型)^[22]。INVEST 模型采用分层设计、阶段性开发,模型结构分为 0—3 层,其中 0 层评估生态系统服务的相对价值,后三层则进行绝对价值评估。INVEST 模型应用领域广泛,涵盖碳存储和固定、水能、水质净化、泥沙滞留等各个方面^[23-28]。此外,生态系统人工智能模型(ARISE 模型)和多尺度地球生态系统综合模型(MIMES 模型)也是应用较为广泛的系统模型,前者是以空间贝叶斯网络为核心的网络化分析模型,着眼于生态系统服务的流量和路径分析^[29];后者则是通过模拟地球表层经济、社会及生态演变来分析生态系统服务的时空变化^[30]。

虽然上述模型在构建过程中已经对生态过程进行了一定程度的简化,但模型的运行依然涉及众多参数,需要大量数据的支持,一方面限制了评估结果的更新,另一方面对模型在数据相对匮乏地区的应用带来制约。因此学术界希望能够在保证生态系统服务空间分布准确性的前提下,根据生态系统要素特征设计简要算法。Egoh 等在北非地区开展的研究中发现,植被初级生产力与生态系统服务表现出较强的正相关关系,这主要是因为初级生产力分布格局形成的驱动因子同时也对多项生态系统服务具有重要影响。因此可以将初级生产力视作生态系统服务分布的替代指标^[31]。基于此,以净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)为核心设计出了生态系统服务评估的定量指标模型。与 INVEST 等评估模型相比,该模型涉及参数明显减少(表 1),数据可通过遥感手段及时获取,利于大尺度生态系统服务动态监测的开展。特别是随着遥感技术的进步,NPP 数据精度不断提高,为模型结果提供了进一步保障^[32]。Maria 等在阿根廷的研究证明,定量指标模型能够满足区域尺度的生态系统服务研究需求^[33]。

2 生态恢复中生态系统服务演变趋势与过程

2.1 生态系统服务演变趋势

对于发生退化、损害、转化甚至完全破坏的生态系统,生态恢复能够从物种组成、生态系统功能、景观环境和生态系统稳定性四方面对其产生作用,改变生态系统的结构、功能及自我维持能力^[9]。可见,生态恢复能够作用于生态系统的各个方面,对生态系统服务会产生重要影响。

关于生态恢复中生态系统服务的演变,越来越多的证据表明,生态恢复措施对生态系统服务的恢复提升具有促进作用^[12],如 Koch 和 Hobbs 等证实,在西澳洲实施的红柳桉树林恢复项目使得区域碳固定和水源涵养能力得到显著改善^[34];Clements 等认为,得益于消除重金属点污染源等措施,阿肯色河流域的水质净化服务和饮用水供给服务也在生态恢复工程中显著提高^[35];Marton 等分析了美国湿地保护项目(WRP)和保育休耕项目(CRP)等生态恢复项目的实施成果,证明通过在湿地和滨岸缓冲带实施生态恢复,由于农业开发而丧失的水质净化服务得以恢复^[36]。Rey Benayas 等在综合全球 89 个生态恢复案例的基础上进行 meta 分析,结果

显示生态恢复与生态系统服务呈正相关关系,能够促使生态系统服务恢复 25%,尚未达到退化前水平^[10]。Dodds 等对美国本土生态恢复效果的评价也得到了类似的结论,评估表明恢复实施十年间生态系统服务提高幅度在 31%—93%之间^[37]。生态系统类型对生态系统服务演变有一定影响,如湿地生态系统在生态恢复中支持服务和调节服务增幅分别为 40%和 47%^[38],而农业生态系统(耕地和牧草地)恢复效果则高于前者,调节服务表现得尤为明显(42%和 120%)^[39]。此外,退化主导因素、恢复方法设计等也会对恢复效果产生影响^[38]。值得注意的是,虽然在个案分析中生态系统服务演变与恢复年限可能表现出一定的相关性,但是有研究提出在总体上看,生态系统服务恢复成果与恢复年限无关,Meli 等认为,生态系统服务的恢复更可能与恢复过程所需时间、恢复措施实施频率等因素有关^[38-39]。中国自 1999 年起开展的退耕还林还草工程是发展中国家规模最大的生态恢复项目。退耕还林工程的实施能够提高植被覆盖、减少地表径流、控制土壤侵蚀、降低河流沉积和养分流失,从而从根本上改善生态系统服务^[40]。黄土高原是退耕还林的重点区域,Feng 等证实 2000—2008 年黄土高原地区 NPP 稳定增加,碳固定服务提升明显,固碳量增加 96.1Tg,由碳源转为碳汇,而退耕还林还草的实施是黄土高原生态系统服务改善的主要驱动因素^[41]。

表 1 NPP 指标模型与 INVEST 模型比较

Table 1 Comparison between INVEST model and NPP-based model

评估目标 Evaluation objective	模型类型 Model type	模型设计 Model design	指标参数 Index parameter
碳固定 Carbon sequestration	INVEST 模型	$C_t = C_a + C_b + C_s + C_d$	C_t 为总碳储量; C_a 为地上部分碳储量; C_b 为地下部分碳储量; C_s 为土壤碳储量; C_d 为枯落物碳储量
	NPP 指标模型	$C_t = \text{NPP} \times (1 - VC_{\text{NPP}}) / (1 - O_w) \times 1.5$	C_t 为总碳储量; NPP 为净初级生产力; VC_{NPP} 为 NPP 变异性; O_w 为水体与平原面积比
水源涵养 Water conservation	INVEST 模型	$Y = (1 - \text{AET}_{ij} / p_x) \times p_x$	Y 为栅格产水量; AET_{ij} 为栅格 x 在 j 类土地利用方式下的年蒸腾量; p_x 为栅格 x 的年降水
	NPP 指标模型	$Y = \text{NPP} \times (1 - VC_{\text{NPP}}) \times IC_s \times S_{ef} \times 1.75$	Y 为产水量; NPP 为净初级生产力; VC_{NPP} 为 NPP 变异性; IC_s 为土壤渗透系数; S_{ef} 为平均坡度修正
土壤保持 Soil conservation	INVEST 模型	$E = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$	E 表示栅格的土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力; K 为土壤可蚀性; LS 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖因子; P 为管理因子
	NPP 指标模型	$E = \text{NPP} \times (1 - VC_{\text{NPP}}) \times (1 - S_{ef}) \times 1.5$	E 表示栅格的土壤侵蚀量; NPP 为净初级生产力; VC_{NPP} 为 NPP 变异性; S_{ef} 为平均坡度修正

2.2 生态系统服务演变过程

生态恢复改变了生态系统格局和过程,使得生态系统服务的产生和提供发生变化。在这一过程中,不同服务类型的演变过程有所差异。随着植被的恢复生长,生态系统的供给服务(木材供给、粮食生产等)和调节服务(碳固定、水质净化等)逐渐恢复;在生态系统的结构(包括形态结构和营养结构)与功能(生物生产、物质循环、能量流动、信息传递)得到一定程度完善的基础上,支持服务得以改善并发挥作用;由于人对景观的主观感受对文化服务有重要影响^[42],因此文化服务的恢复较其他服务类型存在一定的滞后。但是对于生态系统受损较重,需要采用取客土等方式进行物理环境改造的案例,可以认为其生态恢复过程中,生态系统服务的演变遵从 Whisenant 等提出的阈值模型^[43],即首先通过人为干预克服非生物因素阈值,实现支持服务的部分恢复,之后随着生态系统结构的完善,克服生物因素阈值,促进调节服务和供给服务的恢复,最后在恢复成果得以维持的前提下,实现文化服务的恢复。上述趋势在 Ciccarese 等的研究中得到了一定的验证^[44]。就单项生态系统服务而言,不同生态系统服务的演变格局和轨迹具有显著差异。Bullock 等指出,单项生态系统服务的演变情形较为复杂,相对于参照生态系统(Reference Ecosystem),其演变轨迹包括渐近变化、线性变化、单峰

值变化以及随机变化。不同轨迹可能共存于同一个生态恢复项目中^[45]。

2.3 生态系统服务相互关系

近年来,生态系统变化过程中生态系统服务间的相互关系逐渐受到学术界的关注^[46-51]。在生态恢复过程中,生态系统服务的相互关系受到外部和内部作用的共同影响,外部作用表现为恢复措施同时作用于多项生态系统服务,改变了服务的产生基础;内部作用则是服务间存在的交互作用(包括单向作用和双向作用)^[52]。生态恢复过程中,生态系统服务的相互关系主要表现为协同(synergy)和权衡(trade-off)。协同指服务间的演变趋势相同,多项服务共同增强或减弱;权衡则指服务间的演变趋势相异,一类服务的增强导致另一类服务的削弱。生态系统服务的协同和权衡可以分为空间和时间两方面,但在时间上常表现出一定的滞后性,而在空间上表现得相对明显^[53]。目前已经有学者开始对生态恢复中的权衡和协同进行研究,如 Jia 等从以陕西省退耕还林区为例,分析生态系统服务在生态恢复过程中的协同与权衡^[40]。其结果证明退耕还林工程改变了供给服务和调节服务的均衡,加强了供给服务和调节服务间的交互作用,在退耕还林影响下调节服务间表现出协同,而调节服务与供给服务间则表现出权衡;不同土地利用类型的协同和权衡强度存在差异,协同作用在林地最为显著,权衡作用则在灌木中最明显。生态系统服务权衡对于生态恢复目标设计和成果维持具有重要价值^[53-55]。关于生态系统服务权衡的识别和评估,近年来也取得了一系列成果。如 Pan 等提出,可以从 NPP 变化量的角度设计生态系统服务权衡分析框架,根据 NPP 在供给服务和调节服务间的分配变化分析权衡情况^[56]。Raudsepp-Hearne 等将频繁共同出现的生态系统服务集合定义为生态系统服务簇(ecosystem service bundle),并将其应用于生态系统服务协同和权衡识别^[57]。饶胜等引入极值法构建的生态系统服务权衡模型也在分析中取得了较好的效果^[58]。

3 社会经济对生态系统服务维持的影响

生态恢复活动改善了生态系统,为维持生态系统服务提供了自然基础。但是在环境、社会和经济的耦合过程中,利益相关者(stakeholder)的态度和策略同样会影响生态恢复的可持续性,继而影响生态系统服务水平的维持。生态系统服务对收入的影响是决定利益相关者态度的重要因素。供给服务与调节服务间的权衡,使得生态恢复促进调节服务的同时,造成供给服务的降低,对居民收入产生负面影响。收入波动驱使居民对恢复区重新开发,影响生态系统服务恢复的持续性^[59]。我国宁夏省西吉县曾经在联合国援助下,开展大规模植树种草,共增加林草 10.4 万 hm^2 。但是由于恢复植被短期内无法产生经济效益,当地居民毁林复耕,仅三年时间林地和草地损毁率就达到 47% 和 80%^[60]。除收入外,居民对周边生活环境的需求也对生态系统服务维持有重要影响。如在美国萨克拉门托河流域生态恢复中,恢复区周边居民投票决定将恢复规模由 86000 hm^2 大幅缩减至 32000 hm^2 ,原因就是居民认为生态恢复措施对其生活环境带来了负面影响,包括害虫栖息地增加、动物对农田损害、农场文化丧失、治安恶化等^[61],对恢复区的再次开发也会削弱生态系统服务的产生基础。

上述现象的出现,其根源在于生态恢复过程中收益的尺度依赖性^[13],即形成服务的生态尺度与产生收益的空间尺度之间存在差异^[62]。不同空间尺度上的利益相关者,其在各类生态系统服务上的利益差别明显,导致对各生态系统服务类型持有的态度和采取的策略差异显著。一般来说,调节服务和文化服务上的收益体现在大尺度(区域尺度及以上),而供给服务的收益则主要在小尺度上得以体现。服务间的权衡以及大尺度收益对小尺度损失补贴的不足,造成了在生态恢复中,大尺度上利益相关者享受收益,而小尺度上利益相关者承担成本的局面。生态补贴被认为是协调不同尺度利益冲突的有效手段,生态系统服务的价值化评估成果可以作为补贴标准确定的重要依据,此外 Banks-Leite 等提出的基于生态阈值确定补贴的思路也具有很高参考价值^[63]。除生态补贴外,还可以尝试引入新的补偿机制,如 Polasky 等 2014 年基于拍卖理论设计了不同利益相关者之间的支付制度^[64],有效降低了利益信息不完整对补贴标准设置的影响,保障了生态系统服务的供给优化。

4 研究展望

经过数十年的发展,生态恢复由初期单纯关注生态效益转为兼顾社会需求和经济效益。在这种情况下,生态系统服务作为生态功能与人类福祉间的桥梁,受到学术界越来越高的关注。同时,明确生态系统服务时空演变,确定生态恢复效果和收益,也是我国推进生态文明建设战略的实际需求。关于生态恢复和生态系统服务,我国学者已经开展了一系列相关研究,内容涵盖不同的尺度和生态系统类型。高吉喜等对我国大型生态恢复工程实施现状和存在问题进行综合评述,提出未来我国生态恢复工程应当以生态功能为导向,将生态功能作为生态恢复的主要目标^[65]。Zhang 等总结了我国生态系统服务的研究历程,指出未来需要在生态系统服务定义与分类、生态系统结构与功能关系、生态系统服务评价方法及指标的标准化、生态系统服务时空变化四方面进一步深化研究^[66]。但是,目前针对生态恢复和生态系统服务间的作用与响应,仍缺少系统性、整体性分析。我国未来相关研究可以从以下 3 个方面展开:(1)深化生态系统服务的产生机理和演变机制研究,基于动态视角分析生态恢复中生态系统结构、功能和服务间的关系,明确生态系统服务演变趋势、过程、相互关系及主要驱动因素。政策导向下长时间大规模的生态恢复工程是我国生态恢复的重要特征,其在各尺度上对生态系统服务造成的影响也需要在未来的研究中予以关注。(2)在深刻理解生态过程与功能的基础上,结合我国生态恢复和生态建设实践,推动生态系统服务评估框架与方法模型的开创性和集成性创新,增强评估结果与我国生态恢复实践的契合度,提高我国生态系统服务研究水平和国际影响。(3)加强生态系统恢复和生态系统服务相关研究成果在实践中的应用,将生态系统服务纳入生态恢复的设计、实施和管理全过程,将其作为生态恢复规划、物种选择、生态补偿方式及标准设计等的依据,促进生态恢复项目的科学实施和可持续管理。

参考文献 (References):

- [1] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: 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] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 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*, 2009, 24(6): 571-576.
- [4] 傅伯杰. *生态系统服务与生态安全*. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [5] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [6] Assessment M E. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [7] 赵士洞, 张永民. 生态系统与人类福祉—千年生态系统评估的成就、贡献和展望. *地球科学进展*, 2006, 21(9): 895-902.
- [8] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [9] Shackelford N, Hobbs R J, Burgar J M, Erickson T E, Fontaine J B, Laliberté E, Ramalho C E, Perring M P, Standish R J. Primed for change: developing ecological restoration for the 21st century. *Restoration Ecology*, 2013, 21(3): 297-304.
- [10] Rey Benayas J M, Newton A C, Diaz A, Bullock J M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, 2009, 325(5944): 1121-1124.
- [11] Koch E W, Barbier E B, Silliman B R, Reed D J, Perillo G M E, Hacker S D, Granek E F, Primavera J H, Muthiga N, Polasky S, Halpern B S, Kennedy C J, Kappel C V, Wolanski E. Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 29-37.
- [12] Trabucchi M, Ntshotsho P, O'Farrell P, Comín F A. Ecosystem service trends in basin-scale restoration initiatives: a review. *Journal of Environmental Management*, 2012, 111: 18-23.
- [13] Fu B J, Su C H, Wei Y P, Willett I R, Lü Y H, Liu G H. Double counting in ecosystem services valuation: causes and countermeasures. *Ecological Research*, 2011, 26(1): 1-14.
- [14] Abson D J, von Wehrden H, Baumgärtner S, Fischer J, Hanspach J, Härdtle W, Heinrichs H, Klein A M, Lang D J, Martens P, Walmsley D. Ecosystem services as a boundary object for sustainability. *Ecological Economics*, 2014, 103: 29-37.
- [15] Felipe-Lucia M R, Comín F A, Escalera-Reyes J. A framework for the social valuation of ecosystem services. *AMBIO*, 2015, 44(4): 308-318.

- [16] Lü Y H, Ma Z M, Zhang L W, Fu B J, Gao G Y. Redlines for the greening of China. *Environmental Science & Policy*, 2013, 33: 346-353.
- [17] Wong C P, Jiang B, Kinzig A P, Lee K N, Ouyang Z Y. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy. *Ecology Letters*, 2014, 18(1): 108-118.
- [18] Troy A, Wilson M A. Mapping ecosystem services: Practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer. *Ecological Economics*, 2006, 60(2): 435-449.
- [19] Plummer M L. Assessing benefit transfer for the valuation of ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 38-45.
- [20] Stewart G. Meta-analysis in applied ecology. *Biology Letters*, 2010, 6(1): 78-81.
- [21] Bagstad K J, Semmens D J, Waage S, Winthrop R. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 27-39.
- [22] 吴哲, 陈歆, 刘贝贝, 初金凤, 彭黎旭. InVEST 模型及其应用的研究进展. *热带农业科学*, 2013, 33(4): 58-62.
- [23] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, Nalley L L. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [24] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. *林业科学*, 2012, 48(10): 1-5.
- [25] 李婷, 刘康, 胡胜, 包玉斌. 基于 InVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(9): 1242-1250.
- [26] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 刘玉洁. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 183-189.
- [27] Zhang C Q, Li W H, Zhang B, Liu M C. Water yield of xitiao river basin based on InVEST modeling. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 50-54.
- [28] 白杨, 郑华, 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. *生态学报*, 2013, 33(3): 711-717.
- [29] 吕一河, 张立伟, 王江磊. 生态系统及其服务保护评估: 指标与方法. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1237-1243.
- [30] 张振明, 刘俊国. 生态系统服务价值研究进展. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 1835-1842.
- [31] Egoh B, Reyers B, Rouget M, Richardson D M, Le Maitre D C, van Jaarsveld A S. Mapping ecosystem services for planning and management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 127(1/2): 135-140.
- [32] Guanter L, Zhang Y G, Jung M, Joiner J, Voigt M, Berry J A, Frankenberg C, Huete A R, Zarco-Tejada P, Lee J-E, Moran M S, Ponce-Campos G, Beer C, Camps-Valls G, Buchmann N, Gianelle D, Klumpp K, Cescatti A, Baker J M, Griffis T J. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(14): E1327-E1333.
- [33] Barral M P, Oscar M N. Land-use planning based on ecosystem service assessment: A case study in the Southeast Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 154: 34-43.
- [34] Koch J M, Hobbs R J. Synthesis: is Alcoa successfully restoring a jarrah forest ecosystem after bauxite mining in Western Australia? *Restoration Ecology*, 2007, 15(4): S137-S144.
- [35] Clements W H, Vieira N K M, Church S E. Quantifying restoration success and recovery in a metal-polluted stream: a 17-year assessment of physicochemical and biological responses. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(4): 899-910.
- [36] Marton J M, Fennessy M S, Craft C B. USDA conservation practices increase carbon storage and water quality improvement functions: an example from ohio. *Restoration Ecology*, 2014, 22(1): 117-124.
- [37] Dodds W K, Wilson K C, Rehmeier R L, Knight G L, Wiggam S, Falke J A, Dalglish H J, Bertrand K N. Comparing ecosystem goods and services provided by restored and native lands. *Bioscience*, 2008, 58(9): 837-845.
- [38] Meli P, Rey Benayas J M, Balvanera P, Ramos M M. Restoration enhances wetland biodiversity and ecosystem service supply, but results are context-dependent: a meta-analysis. *PLoS One*, 2014, 9(4): e93507.
- [39] Barral M P, Rey Benayas J M, Meli P, Maceira N O. Quantifying the impacts of ecological restoration on biodiversity and ecosystem services in agroecosystems: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 202: 223-231.
- [40] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, Hou G H, Liu Y, Wang X F. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [41] Feng X M, Fu B J, Lü N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846-2851.
- [42] 任海, 王俊, 陆宏芳. 恢复生态学的理论与研究进展. *生态学报*, 2014, 34(15): 4117-4124.
- [43] Whisenant S G. *Repairing Damaged Wildlands: A Process-Orientated, Landscape-Scale Approach*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [44] Ciccarese L, Mattsson A, Pettenella D. Ecosystem services from forest restoration: thinking ahead. *New Forests*, 2012, 43(5/6): 543-560.
- [45] Bullock J M, Aronson J, Newton A C, Pywell R F, Rey-Benayas J M. Restoration of ecosystem services and biodiversity: conflicts and

- opportunities. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(10): 541-549.
- [46] Bai Y, Zheng H, Ouyang Z Y, Zhuang C W, Jiang B. Modeling hydrological ecosystem services and tradeoffs: a case study in Baiyangdian watershed, China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(2): 709-718.
- [47] Power A G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2959-2971.
- [48] Rodríguez J P, Beard Jr T D, Bennett E M, Cumming G S, Cork S J, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28.
- [49] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [50] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 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*, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [51] Maes J, Paracchini M L, Zulian G, Dunbar M B, Alkemade R. Synergies and trade-offs between ecosystem service supply, biodiversity, and habitat conservation status in Europe. *Biological Conservation*, 2012, 155: 1-12.
- [52] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [53] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 罗跃初. 生态系统服务功能管理研究进展. *生态学报*, 2013, 33(3): 702-710.
- [54] White C, Halpern B S, Kappel C V. Ecosystem service tradeoff analysis reveals the value of marine spatial planning for multiple ocean uses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(12): 4696-4701.
- [55] 林泉, 吴秀芹. 生态系统服务冲突及权衡的研究进展. *环境科学与技术*, 2012, 35(6): 100-105.
- [56] Pan Y, Wu J X, Xu Z R. 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*, 2014, 17: 79-86.
- [57] Raudsepp-Heame C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [58] 饶胜, 林泉, 王夏晖, 张惠远, 陆军. 正蓝旗草地生态系统服务权衡研究. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 81-86.
- [59] Seppelt R, Dormann C F, Eppink F V, Lautenbach S, Schmidt S. A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(3): 630-636.
- [60] 毛军, 张克斌, 刘刚. 世界粮食计划署“2605”项目对巩固退耕还林成果的启示. *防护林科技*, 2006, (6): 63-65.
- [61] Buckley M C, Crone E E. Negative off-site impacts of ecological restoration: understanding and addressing the conflict. *Conservation Biology*, 2008, 22(5): 1118-1124.
- [62] 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.
- [63] Banks-Leite C, Pardini R, Tambosi L R, Pearse W D, Bueno A A, Bruscagin R T, Condez T H, Dixo M, Igari A T, Martensen A C, Metzger J P. Using ecological thresholds to evaluate the costs and benefits of set-asides in a biodiversity hotspot. *Science*, 2014, 345(6200): 1041-1045.
- [64] Polasky S, Lewis D J, Plantinga A J, Nelson E. Implementing the optimal provision of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(17): 6248-6253.
- [65] 高吉喜, 杨兆平. 生态功能恢复: 中国生态恢复的目标与方向. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(1): 1-6.
- [66] Zhang B, Li W H, Xie G D. Ecosystem services research in China: Progress and perspective. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1389-1395.