

郭宗亮,刘亚楠,张璐,等.生态系统服务研究进展与展望[J].环境工程技术学报,2022,12(3):928-936.

GUO Z L,LIU Y N,ZHANG L,et al.Research progress and prospect of ecosystem services[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(3): 928-936.

生态系统服务研究进展与展望

郭宗亮¹,刘亚楠²,张璐³,冯朝阳³,陈艳梅^{2*}

1.山东省创新战略研究院

2.河北师范大学资源与环境科学学院,河北省环境变化遥感识别技术创新中心

3.中国环境科学研究院生态所

摘要 生态系统服务对人类福祉具有不可替代性。基于文献阅读方法,对生态系统服务研究进展和趋势进行总结。主要内容包
括:1)阐述生态系统服务的概念与内涵;2)从生态系统服务货币价值评估、生态系统服务供需平衡与流转、生态系统服务的权衡
和协同3个方面,梳理了国内外生态系统服务相关研究进展;3)提出生态系统格局-过程-功能-服务内在关系将是生态系统服务
研究的热点,生态系统服务供需与空间流转将成为重要研究方向,生态系统服务权衡与协同将是生态系统管理研究的重点内容,
生态系统服务与人类福祉的反馈机制研究将更加深入。该研究将有助于科学认识生态系统服务对人类社会的可持续发展的支撑
作用,促进生态系统服务研究成果服务于实践。

关键词 生态系统服务;价值评估;供需平衡;权衡;协同;空间流转;人类福祉

中图分类号:X53 文章编号:1674-991X(2022)03-0928-09 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210192

Research progress and prospect of ecosystem services

GUO Zongliang¹, LIU Yanan², ZHANG Lu³, FENG Chaoyang³, CHEN Yanmei^{2*}

1.Shandong Academy of Innovation Strategy

2.College of Resource and Environment Sciences, Hebei Technology Innovation Center for
Remote Sensing Identification of Environmental Change, Hebei Normal University

3.Institute of Ecology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract Ecosystem services are irreplaceable for human well-being. Based on the method of literature review, the research progress and trend of ecosystem services were summarized. Firstly, the concept and connotation of ecosystem services were expounded. Secondly, the research progress of ecosystem services were combed in terms of the monetary value evaluation of ecosystem services, the supply-demand balance and transfer of ecosystem services, and the trade-offs and synergies of ecosystem services in China and abroad. Thirdly, it was proposed that the internal relationship of ecosystem pattern-process-function-services would be the focus of ecosystem services research, the supply-demand and spatial transfer of ecosystem services would become an important research direction, the trade-offs and synergies of ecosystem services would be an important part of ecosystem management research, and the feedback mechanism of ecosystem services and human well-being would be further studied. The research would help to scientifically understand the supporting role of ecosystem services for the sustainable development of human society, and to promote the application of ecosystem services research results to practice.

Key words ecosystem services; value evaluation; balance of supply and demand; trade-offs; synergies; spatial transfer; human well-being

全球经济社会快速发展,人类对生态系统的干
预和侵占日益增加,自然环境面临巨大压力,表现为
耕地面积锐减、水资源短缺、土地沙化、草场退化、

生物多样性受到威胁。目前地球上的湿地、森林、
草原、河流和海岸等自然生态系统所提供的生态系
统服务类型中,约60%正在退化或处于不可持续利

收稿日期:2021-05-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0506905);国家社会科学基金项目(20BJY047)

作者简介:郭宗亮(1977—),男,副研究员,主要从事创新战略、创新生态与科学计量学研究,77258667@qq.com

* 责任作者:陈艳梅(1970—),女,教授,博士,主要从事区域生态系统评估、生态安全与生态补偿机制研究,chenyanmei@mail.hebtu.edu.cn

用状态^[1]。严峻的生态环境形势下,国际上一系列有关生态系统服务的研究计划出台。2001年联合国“生态系统服务与人类福祉”的千年生态系统评估计划(MA)、2005年国际地圈生物圈计划(IGBP)与国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)等出台,2012年在联合国环境规划署(UNEP)有关生物多样性和生态系统服务的科学-政策平台(IPBES)正式建立,上述国际计划或平台推动了在全球和区域层面生态系统服务相关研究,为各级政府开展生态系统管理提供了科学依据。

中国人口众多,经济高速增长,给复杂而脆弱生态环境带来巨大压力,生态环境形势更加严峻。面对环境污染、资源约束、生态退化等问题,中国政府转变发展理念,提出生态文明新思想。作为生态文明建设的抓手,保护“山水林田湖草”等自然或半自然生态系统,提升其生态系统服务能力,已经成为国家层面生态保护和建设活动的核心内容。

在上述形势下,国内外不同尺度生态系统服务供需矛盾与空间流转、权衡等研究已成为生态科学领域的研究热点,生态系统服务相关研究具有重要理论和现实意义。笔者系统梳理生态系统服务相关概念及内涵,回顾国内外相关研究实践,探讨当前研究存在的问题,并对其发展方向进行了展望,以期正确认识生态系统服务的科学内涵,为生态系统服务相关研究成果逐步应用于实践提供参考。

1 生态系统服务概念与内涵

1.1 生态系统服务概念

生态系统服务概念是在生态系统概念明确以后提出的。20世纪30年代,生态系统的概念由Tasley提出,此后科学家借助现代技术手段,对生态系统的组成、结构、功能以及服务等方面开展研究,生态学研究内容不断丰富,应用越来越广泛,并在20世纪60年代逐渐发展形成了完整的生态学科体系^[2]。随后,生态系统所提供的服务得到科学表达。1970年《人类活动对全球环境的影响》研究报告中首次使用了生态系统服务的概念,并列举了自然生态系统对人类的服务,包括害虫控制、昆虫传粉、土壤形成、洪水调节以及物质循环等方面^[3]。此后,Ehrlich等^[4]在讨论生态系统维持土壤肥力和基因库作用时,再次提及生态系统服务这一概念。Westman^[5]提出“自然的服务(nature's service)”概念及其价值评估。随后,相关研究不断见诸于文献中,生态系统服务这一科学术语逐渐为人们所接受和认可。

自从生态系统服务的概念提出后,相关研究逐

步展开并不断深入,对生态系统服务这一概念的理解也逐步多样化,其中最具代表性的是Daily^[6]在1997年出版的有关自然服务专著以及Costanza等^[7]在同年发表的对全球生态系统服务价值评估的学术论文。Daily^[6]提出,生态系统服务是自然生态系统及其物种提供的供给与维持人类生存的条件和过程,是通过生态系统的功能直接或间接得到的产品或服务。Costanza等^[7]认为,生态系统服务是生态系统为人类提供的产品和服务,代表人类直接或间接从生态功能中获得的各种利益;同时对生态功能和生态系统服务进行了简单区分,生态功能强调生态系统的生物和非生物过程,生态系统服务则侧重表达由生态过程所产生的对人类和环境有益的效用。MA工作组认为,生态系统服务是人类从生态系统中获得的效益^[1],此定义目前被广泛接受和采用。

随着相关研究的深入,学者们开始对生态系统服务的概念提出不同观点。如Wallace^[8]认为,以往对生态系统服务的定义没有区分服务产生过程、获取过程和最终效益,生态系统服务是生态系统管理预期的目标或成果,应根据生态系统格局与生态组分来定义生态系统服务;生态系统服务仅包括食物、木材、饮用水以及文化价值等人类能直接消费的各种生态资源,生态过程不是生态系统服务,而是服务生产方式,生态系统管理就是通过对生态过程的管控来得到有利于人类社会良性发展的生态系统服务。Boyd等^[9]认为,生态系统服务是核算人类社会从自然环境获得利益的适宜手段,是为创造人类福祉而直接使用或者消费的自然组分终端,其内涵是生态系统的最终贡献;并指出生态系统服务不是人类从生态系统获得的收益本身,而是能为人类提供福利的生态组分。Fisher等^[10]受传统经济学的会计系统启发,提出需要区分生态系统服务的即时收益和最终收益,只有终极服务的价值才可以累加,通过这种方法尽量避免重复计算;同时提出不管是生态系统的组成要素还是生态过程,不管是直接的还是间接的,只要是创造人类福祉所使用的,生态系统的各个方面都可称为生态系统服务,即生态系统服务是人类为创造福祉而直接或者间接使用的生态系统的各个方面。

Costanza^[11]反驳了上述观点,认为这些学者研究的前提假设存在问题,现实世界复杂多变,并不像他们设想的有清晰边界,有固定线性过程,生态系统格局、过程与服务之间存在复杂的相互反馈作用,在实践中很难清楚区分手段与目标。Costanza提出中间服务也属于生态系统服务,生态系统服务从内涵上

也不是生态系统最终产品,最终产品应该是可持续的人类福祉。

近年来,欧洲环境署提出生态系统服务是生态系统对人类福祉的贡献,生态产品和惠益是从生态系统中提取出来的人类能够使用的部分,当生态系统最终产出转化为生态产品(如木材、饮用水、药材等)和体验(美学感受、灵感等)后,就不再与其来源的生态系统具有功能上的连接。生态系统服务与产品从根本上依赖于生态过程,非生物的产出并不属于生态系统服务^[12]。

生态系统服务概念从提出至今,其定义和内涵就在不断地发展完善,将来还会随研究目的和研究对象的变化而不断发展更新。根据前人对生态系统服务的定义和理解,结合社会经济发展对生态系统服务的需求,笔者将生态系统服务定义为基于生态系统格局、过程和功能,自然生态系统为人类福祉所提供的各种服务与产品。

1.2 生态系统服务内涵

生态系统服务的概念是人类深刻理解自然生态系统与人类生存关系后提出来的,蕴涵着丰富的科学内涵,包括以下 4 个方面。

生态系统格局、过程与功能是生态系统服务产生的基础。生态系统格局决定其生态功能,格局变化决定和制约着过程和功能的变化。生态系统合理的格局、顺畅的生态过程和健康的生态功能是维持生态系统服务的基础。如大气中碳氧平衡的调节服务,依赖自然生态系统和人工生态系统空间合理布局,以及它们之间正常的碳循环过程,如果森林、草地等自然生态系统占比太少,工厂数量太多,人口密度太大,则碳氧平衡的调节服务无法较好地实现。

生态系统功能与生态系统服务不是一一对应的。生态系统功能侧重于反映其自然属性,即使没有人类的需求,它们同样存在;生态系统服务则是基于人类的需要、利用和偏好,反映了人类对生态系统功能的利用。如果生态系统功能消失,生态系统服务将无从谈起。但是二者不是一一对应的关系,一种生态系统服务可以由多种生态系统功能产生,一种生态系统功能也能产生 2 种或多种生态系统服务。如土壤保持服务是由生态系统中 C、N 和 P 循环和营养过程等所提供,生态系统的水分循环功能可以提供水供应、水调节和减缓旱涝灾害等服务。

生态系统的服务和产品相互依存。比如森林中的树木,如将其砍伐作为木材或燃料,得到的是产品;如果让它们生长并享受其净化和美化功能,人类获得了服务。很多时候,获得产品还是服务,取决于

人类的行为和利用方式。另一方面,自然所提供的生态系统服务经常是人类获得产品的基础。如种植的庄稼获得了丰收,在获取产品的事实背后,是当地土壤和气候为人类提供的优质生态系统服务。

生态系统服务不需要人类,而人类福祉却离不开生态系统服务。目前,人类享受到的生态系统服务是自然生态系统长期演化的结果,在人类出现以前,自然生态系统就已存在,自然生态系统服务的存在不需要得到人类的认可。同时,有些自然生态系统服务的性能和功益可以被人类感觉到,但大多数生态系统服务在平时无法被人类感知,只有在人类对大自然做了坏事,破坏了生态功能而引起某些生态系统服务不足或丧失时才能意识到。生态系统服务作用范围广泛,运行方式复杂,并且大部分无法被现代技术所替代,但其又是人类福祉、社会进步所必需的。

2 生态系统服务国内外相关研究进展

生态系统服务概念和分类体系提出后,相关研究与评估工作很快成为国际生态学界和生态经济学界研究的热点,本研究从 3 个方面梳理生态系统服务相关研究进展。

2.1 生态系统服务货币价值评估进展

1991 年,国际科学联合会环境问题科学委员会(SCOPE)召开了有关生物多样性的经济价值评估会议,此后生态系统服务与生物多样性的经济价值量化研究得以广泛开展。如 Tobias 等^[13]评价了热带雨林保护区生态旅游的价值; Chopra^[14]评估了印度热带落叶林的非木材林产品的经济价值; Gren 等^[15]对欧洲多瑙河洪泛区的生态系统服务经济价值进行了评估; Costanza 等^[7]总结了前人的研究成果,对全球生态系统服务进行了经济价值定量研究,该研究的某些数据存在一些偏差和不足,引起了广泛的争议。为此,著名杂志 *Ecological Economics* 专门开辟了专栏进行讨论,这些讨论推动了生态系统服务研究,促进了全球范围内的生态系统服务价值研究的实践应用。进入 21 世纪后,国外学者在不同空间尺度以及单项生态系统服务价值评估方面开展了广泛且众多的研究,如 Sutton 等^[16]对全球生态系统的市场价值和非市场价值进行了评估,并将研究结果与各国 GDP 的关系进行了定量分析。Lal^[17]评估了太平洋沿岸红树林的经济价值,并且阐明了其对环境决策的重要意义。Pattanayak^[18]评价了印度尼西亚 Manggarai 流域生态系统减轻旱灾的经济价值。MA 工作组开展了全球尺度以及区域尺度的生态系统与人类福祉的关系研究^[1]。2005 年后,更多

的研究开始关注生态系统服务空间异质性、服务价值与经济、社会等的内在关系。如 Hein 等^[19]开展了生态系统服务价值评估与空间尺度、利益相关者的关系研究。Grét-Regamey 等^[20]在瑞士阿尔卑斯山的高寒地区,利用投入产出的经济学方法评估生态系统服务价值,并将区域经济和生态系统服务研究进行融合。Kozak 等^[21]以美国伊利诺伊州 Des Plaines 和 Cache 河为例,利用对数线性和指数衰减的方法探讨了从生态系统服务产生源头到人类受益者全程的生态系统服务效益地理变化规律。

中国的生态系统服务经济价值评价工作始于 20 世纪 80 年代初,主要是对森林资源经济价值量进行核算。1982 年,张嘉宾^[22]利用影子工程法和替代费用法,测算了云南怒江、福贡等县森林保持土壤和涵养水源的经济价值量。1988 年,国务院发展研究中心专门设立“资源核算纳入国民经济核算体系”课题组,开始评测中国森林资源、草地资源、土地资源等的经济价值。侯元兆等^[23]较全面地对中国森林资源的涵养水源、防风固沙、净化大气的经济价值进行了测算,揭示出这 3 项生态系统服务经济价值是立木价值的 13 倍。随着国际上生态系统服务经济价值评价工作的兴起,20 世纪 90 代中期以后,中国学者开始系统地进行生态系统服务经济价值定量研究工作。如肖寒等^[24-27]对中国以及不同区域各类生态系统的服务经济价值进行了定量研究,生态系统类型涉及陆地、森林、草地、湿地、海洋等;于格等^[28-29]尝试利用 3S 技术对生态系统服务的动态过程进行有效分析和评价。随着更多现代技术的运用,研究逐步由静态评估向动态模拟转换。吴爱林等^[30]利用不同方法评估了不同区域生态系统服务价值的动态变化、空间异质性特征等;孙宝娣等^[31]在总结近年研究成果的基础上,提出生态系统服务价值尺度转换的技术和方法运用仍然存在一些问题,并分析了该类型研究中空间尺度转换的概念。

生态系统服务货币价值评估与相关研究逐步从依靠监测或统计数据走向依靠遥感、地面监测等多元融合数据,逐渐从单点价值评估转向空间格局及其动态变化规律研究。生态系统服务货币价值研究实践越来越多,正在向模型化、精准化、生态功能产生过程及形成机制、生态功能向服务的转化率等纵深方向发展。

2.2 生态系统服务供需平衡与流转研究进展

在国际上,多数学者重视自然和人为的双重驱动作用,构建研究区单个或多重生态系统服务类型供需平衡关系图,再通过生态系统服务流转来研究

供需关系。Fisher 等^[10]明确区分服务产生区(service production areas)和服务受益区(service benefit areas),研究者非常关注生态系统服务空间流转方向。在对生态系统服务供需存在空间错位认识的基础上,Locatelli 等^[32]基于 ArcGIS 平台,利用专家知识以及模糊逻辑模拟计算了生态系统服务从多种生态系统到达多元用户的流转过程。随后,学者们还进一步研究生态系统服务供给和需求的格局,如 Kroll 等^[33]研究德国东部地区 Leipzig-Halle 城乡梯度带之间的生物能供给,将燃料作物的耕地以及森林作为供给区,以城市和工业用地等为需求区,基于能源公司、郡与州等的统计数据构建空间模型,完成供需关系图。Bagstad 等^[34]强调生态系统与其受益者之间的空间连通性的重要性,提出服务路径属性网络(SPAN)模型,分析了 5 类生态系统服务的 SPAN 框架的实现途径,并讨论如何将该模型推广到其他生态系统服务。Serna-Chavez 等^[35]以服务供给区、服务受益区和服务空间流动可达范围 3 个基本要素来描述生态系统服务空间特征,并根据 3 个要素之间的空间位置关系来表达生态系统服务供需关系;之后提出量化研究框架,根据生态系统服务供给源的位置、影响范围以及受益区位置等,确定受益区从特定的供给源获得生态系统服务流转的比率。Yoo 等^[36]结合空间精确的沉积物传递模型和享乐价格方法,在亚利桑那州进行了生态系统服务的价值流动分析。Vreboos 等^[37]基于 GIS 平台,使用生态系统服务评分表对不同模式的生态系统服务流进行了呈现和评价。Jorda-Capdevila 等^[38]整合了水资源配置模型以及生态系统服务供给模型,通过描绘水资源与需求点的路径,建立水资源与生态系统服务供给的曲线关系,刻画了与水资源动态配置相关的生态系统服务供给与需求之间的流转特征。Zank 等^[39]研究了城市扩张对于美国华盛顿州普吉特海湾自然资源存储与生态系统服务流转的影响。Vigl 等^[40]研究了生态系统服务的提供与其受益者之间的空间连通性,提出这是理解生态系统功能及其管理的基础,该研究构建了生态系统服务供应链,分析生态系统内特定链环之间的相互关系,以及生态系统服务从自然景观流向周围土地时的实际效益。

随着国际上相关研究的深入,国内关于生态系统服务供需及流转研究的文献开始出现并逐渐增多。如甄霖等^[41]制定了生态系统服务消费的概念框架,探索了生态系统服务-消费-管理之间的相互关系。邓妹凤^[42]以生态城市建设为主线,以榆林市 TM(thematic mapper)遥感影像为数据支撑,运用功

能当量法对榆林市生态系统服务供给的时空变化特征进行分析,从人类对服务需求出发,分析了榆林市生态系统服务供需平衡与现存矛盾状况。郑悦^[43]选取 8 项指标,将量化结果作为园区对利益相关者的生态系统服务供给能力,通过调查问卷法分析利益相关者对研究区的需求,采用中位数标准化排序法将供给服务与需求条件进行配置。彭建等^[44]选用单位面积生态系统服务价值当量法,测算广东省绿地生态系统服务供给量,以地均 GDP、土地利用开发程度以及人口密度等来反映区域生态系统服务需求量,基于生态系统服务供需平衡格局,提出研究区生态网络建设分区方案。由于生态系统服务在供给和利用时常存在时空差异,便产生了生态系统服务的空间流动。陈江龙等^[45]以南京市主体功能区为基础,定量分析各保护型区域的生态系统服务对各开发型区域的辐射力,计算出不同保护型区域为各开发型区域所提供的生态系统服务价值比例。韦妮妮^[46]以泉州湾河口湿地生态系统为研究对象,研究城市湿地生态系统与区域城市社会经济系统间各种生态系统服务流的传递、转化及其相互作用,归纳得出城市湿地生态系统服务的空间流转规律,随后采用能值-货币分析方法,计算了湿地生态系统服务价值,分析其生态系统服务的空间流过程。乔旭宁等^[47]运用格兰杰因果关系检验方法及灰色关联模型,分析了渭干河流域生态系统服务空间流转对居民福祉的影响。蒋毓琪等^[48]以森林生态系统服务空间流转为视角,测算出浑河流域上游向沈阳城市段空间流转的生态系统服务价值,并说明浑河流域上游森林生态系统服务空间流转对沈阳城市段供水量影响是由多个因素共同决定的。

上述研究能够通过划分生态系统服务供应区和需求区,分析生态系统服务供需矛盾以及产生空间错位的原因,初步掌握生态系统服务空间流转的方向,为自然资源合理空间配置服务;但由于生态系统服务空间流转具有客观性,受自然规律支配,也受人类生产生活的调控,当前研究者对生态系统服务流流量掌握不精确^[49],应该增加生态系统服务流流量或流转效率的量化研究,为决策者制定合适的生态系统管理政策提供科学依据。

2.3 生态系统服务的权衡和协同研究进展

不同生态系统服务之间具有极其复杂的相互作用关系,可简单归纳为 2 种:权衡和协同。权衡是不同生态系统服务类型之间的关系相互冲突,协同则指 2 种或多种类型生态系统服务存在同时增加或减少趋势。

国际上,有关生态系统服务权衡与协同研究的成果颇为丰富。如 Bekele 等^[50]将流域建模与多目标进化算法进行融合,模拟评估研究区非点源污染控制、农业生产等多类生态系统服务,并提出生态系统服务权衡方案。Naidoo 等^[51]比较了生态系统服务地图和传统生物多样性保护目标的全球分布,提出生物多样性最大化的区域提供的生态系统服务并不比随机选择的其他区域多,需要进行跨学科研究以便准确掌握保护生物多样性以及生态系统服务之间的协同和权衡关系。Bennett 等^[52]指出最大限度地生产一种生态系统服务往往导致其他生态系统服务的产生量大幅减少,该研究基于驱动者的角色和服务之间的交互作用,提出了生态系统服务之间的关系类型。Bradford 等^[53]选用一个长期森林管理试验,对碳循环和生态复杂性目标进行实质性权衡,提出一种理解利益与权衡的方法,为定量评估不同管理选项的后期效益提供了一个简单而灵活的框架。Butler 等^[54]在澳大利亚大堡礁地区选择 4 种不同土地利用情景,模拟计算了水质调节服务与其他类型生态系统服务之间的权衡或协同关系。Meehan 等^[55]在美国中西部滨岸,选择牧草种植和玉米种植 2 种情境,应用 InVEST 模型评价了能量产出、污染净化、昆虫授粉等 7 种单项生态系统服务价值及其总价值的变化,指出牧草种植会造成 2 种供给服务价值减少,但其他 5 种服务价值会有不同程度的增加。Castro 等^[56]从供给和社会需求 2 个方面,在生物物理、社会文化和经济 3 个维度对生态系统服务权衡进行量化研究,研究结果对从不同价值维度分析生态系统服务的空间错位,协助决策者辨识生态系统服务退化区和生态保护优先区,以及监测管理实施过程中潜在矛盾等都有重要的意义。Segura 等^[57]提出了一种生态系统服务协同管理与评估新方法,从决策开始就考虑到决策者、各方利益相关者、技术人员以及当地居民偏好等,并以西班牙巴伦西亚自然公园的 3 种生态系统服务的关系进行了实践研究,该方法解决了资源有限条件下确定管理目标优先级的困难,同时促进所有相关人员之间达成一致意见。Langemeyer 等^[58]提出多目标决策分析能够弥补生态系统服务评价与土地利用规划的不足,同时兼顾多方利益,避免决策失误,是实现生态系统和生态系统服务有效管理的重要途径。

在中国,生态系统服务权衡和协同已经引起研究者广泛关注。李屹峰等^[59]基于三期土地利用数据,研究了密云水库流域 4 种生态系统服务的动态变化及相互之间的权衡关系。杨晓楠等^[60]分析了关

中—天水经济区的耕地、林地、草地景观中各生态系统服务间的权衡与协同关系。王鹏涛等^[61]基于逐像元偏相关的时空统计制图方法,对汉江上游流域2000—2013年的土壤保持服务、产水服务、植被碳固定(NPP)服务等之间的权衡与协同关系时空变化进行分析。陈登帅等^[62]以渭河流域关中—天水经济区段为研究对象,在子流域尺度估算了生物多样性、固碳和产水等生态系统服务量,定量分析各生态系统服务量之间的权衡和协同关系,并预测了未来土地利用变化情景下,基于生态系统服务的最优土地配置格局。

目前,国内外有关生态系统服务权衡与协同的研究成果越来越多,涉及不同时空尺度、不同生态系统类型,但相关研究成果仍处于理论分析与模型模拟阶段,如何将相关研究成果的科学认知转化到决策应用仍需继续努力。

3 生态系统服务研究展望

3.1 生态系统格局—过程—功能—服务内在关系研究将是热点

目前,研究者还不能准确把握生态系统格局、过程、功能与服务的内在联系,对于生态过程、经济过程与社会发展之间的复杂关系也缺乏准确认识,很难精确模拟和预测在经济社会高速发展背景下的自然生态系统服务的状态与变化,导致出现研究结果差异大、应用性不强等问题。为了获得更切实可行的生态建设方案,需要加强生态格局、过程、功能与服务的基础研究,弄清楚四者之间的内在关系。

格局是区域内不同生态要素的空间组合形式;过程是基于各类生态要素在区域之间或区域内能够产生能量流、物质流和信息流等,使区域之间或区域内部产生相互影响与相互作用;基于格局与过程,区域内生态系统便具有生态功能;当生态功能被赋予人类价值内涵时便成为区域生态系统服务与产品。格局是过程的载体,格局的变化导致过程的改变,过程是塑造格局的动因和驱动力,格局和过程的相互作用会表现出不同类型的生态系统功能和服务产品。因此,四者之间相互影响,互为因果,四者之中有一个发生变化,其余三者相应会有响应。要持续获得充足生态系统服务和产品,必须掌握四者相互作用关系,这是生态系统管理和生态保护工作的基础,也将是生态系统服务相关研究关注的焦点。

3.2 生态系统服务供需与空间流转将成为重要研究方向

生态系统服务供需关系研究还处于起步阶段。

在已有的研究中,多是针对特定生态系统服务类型,从自然资源的合理利用和基本生态系统服务消费角度入手,测度该类型生态系统服务供给与需求之间的平衡状况。然而,分析影响平衡关系的主导因素,进一步分析不同地区或不同群体对生态系统服务消费差异的成果较少,探索生态环境严峻情境下生态系统服务消费的替代方式的成果也较缺乏。生态系统服务供需关系研究需要全面弄清楚生态系统服务提供方式、所在区域地理背景、资源禀赋、经济水平、相关政策、人口密度、文化背景等影响因素。未来在已有研究基础上探索生态系统服务供需矛盾与关系优化途径等,基于生态系统服务供需空间格局模拟其空间流动的路径与范围,应逐步明确生态系统服务供给和享用的利益相关者。

目前,受到数据可获取性和专业认知的限制,多数研究是在中小尺度上,而在国家尺度、洲际尺度或全球尺度的研究成果还较少且较难应用于实践。要解决上述问题,一方面需要整合多部门的已有各类数据库,包括国土、环保、城建、测绘、科研等部门,各类地理、生态、统计和遥感等数据,并充分利用已有数据衍生的新数据;另一方面应组建来自不同学科的专业团队,尤其是要吸纳计算机学、经济学、生态学等学科的专业人才,通过学科之间的互相学习,提高专业认知能力,增强专业建模能力,对生态系统服务辐射效应、辐射距离、供需关系、空间流转等进行模型模拟。明确生态系统服务的供给区和需求区,确定区域之间和区域内部的利益相关者,建立生态系统服务供给和使用反馈机制,为制定科学合理的生态系统服务消费模式提供科学依据,这是生态系统服务研究的重要方向之一。

3.3 生态系统服务权衡与协同将是生态系统管理研究重点

不同生态系统服务之间的权衡或协同关系,与人类的需求偏好和生态系统特征有关。当人们消费某一种类型或某几种类型的生态系统服务时,就会有意或无意地对其他类型生态系统服务的提供能力产生影响。目前不同区域不同类型生态系统所提供的各类服务间相互作用定量关系研究还未全面开展,尤其在“人地矛盾”突出,多种类型生态系统服务之间关系尚未厘清,需要研究者开展相关探索,为生态系统管理提供科学依据。

通过生态系统基础理论,识别各种类型生态系统服务能够达到的空间范围,厘清生态系统服务之间的各种变化与相互作用关系,揭示在自然因素与人为因素相互作用条件下,或所设定的不同情境下,

生态系统服务之间所表现出的权衡或协同关系,分析权衡或协同所展示出的空间格局,讨论生态系统服务的动态变化及面临的主要问题,揭示出区域多种生态系统服务之间的内在关联特征及其主导因素。基于生态系统服务权衡与协同关系研究成果,通过生态系统管理,进行生态系统格局优化,对生态过程进行监管与干预,实现区域生态系统服务综合价值的最大化目标,这将是生态系统管理研究的重点内容。

3.4 生态系统服务与人类福祉的反馈机制研究将更加深入

生态系统服务研究最初热点主要侧重于生态系统服务经济价值评估,目前生态系统服务与人类福祉的关系越来越受到关注,尤其生态系统服务与人类福利的空间关系、因果联系与二者的动态过程相关性等开始受到重视。这方面研究难度较大,研究成果还较少,鲜有突破性成果。不过,即便困难重重,也有部分研究者正在开展相关研究,试图弄清楚生态系统服务与人类福祉之间的反馈机制,以期获得有实践价值的研究成果。

首先,开展对人类福祉的多指标测度研究。当前对人类福祉的测度主要包括食物、饮用水等物质生产服务指标,其他有关福祉指标还较少,研究也不够深入,不能科学测度生态系统服务对人类福祉的贡献度。生态系统服务涉及人类福祉的很多方面,对人类福祉的贡献应是多维度的,并且二者之间还存在一些必然联系,应逐步将自然生态要素转换为社会学有关的变量,如健康、安全和幸福指数等,将自然生态领域数据转换为人类福祉领域的定量指标,构建全方位的多指标人类福祉测度模型,掌握生态系统服务对于人类福祉的定量作用。其次,开展生态系统服务对人类福祉的多时空尺度测度研究。生态系统、社会系统以及经济系统都是处于不断变化之中,不能假定在一个尺度上获得的研究结果在另一个尺度上是自动有效的,也不能根据短期试验数据得出长期规律性结论,一个区域的福祉发生变化另一个区域不一定发生。不同时空尺度的生态系统服务相互影响将对人类福祉产生复杂影响,只有在特定时空尺度上人类才能进行相对科学地判断和比较准确地表达。因此,应开展多时空尺度生态系统服务与人类福祉的反馈机制研究,得到相对正确的研究成果,为生态系统管理提供科学依据。

4 结语

(1)生态系统服务是基于生态系统格局、过程和

功能,自然生态系统为人类福祉所提供的各种服务与产品。生态系统服务的内涵包括生态系统格局、过程与功能是生态系统服务产生的基础;生态系统功能与生态系统服务不是一一对应关系;生态系统的服务和产品相互依存;生态系统服务不需要人类,而人类福祉却离不开生态系统服务。

(2)生态系统服务货币价值评估逐步从依靠监测或统计数据走向依靠遥感、地面监测等多元融合数据,逐渐从单点价值评估转向空间格局及其动态变化规律研究。生态系统供需与空间流转研究能通过划分生态系统服务供需区,分析生态系统服务供需矛盾以及产生空间错位的原因,初步掌握生态系统服务空间流转方向。生态系统服务权衡与协同的研究涉及不同时空尺度、不同生态系统服务类型,仍处于理论分析与模型模拟阶段,尚需加强相关研究成果的实践转化。

(3)提出生态系统格局-过程-功能-服务内在关系研究将是生态系统服务研究的热点,生态系统服务供需与空间流转将成为重要研究方向,生态系统服务权衡与协同将是生态系统管理研究的重点内容,生态系统服务与人类福祉的反馈机制研究将更加深入。

由于篇幅限制,该文未对国内外生态系统服务研究方法进行综述,也未对国内外有关生态系统服务类型划分的成果进行概括和总结,不足之处将在后续研究中完善。

参考文献

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis[R]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [2] ODUM E P. The strategy of ecosystem development[J]. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [3] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. *资源科学*, 2001, 23(6): 5-9.
XIE G D, LU C X, CHENG S K. Progress in evaluating the global ecosystem services[J]. *Resource Science*, 2001, 23(6): 5-9.
- [4] EHRLICH P, EHRLICH A. Extinction: the causes and consequences of the disappearance of species[M]. New York: Random House, 1981.
- [5] WESTMAN W E. How much are nature's services worth[J]. *Science*, 1977, 197: 960-964.
- [6] DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [7] COSTANZA R, D'ARGE R, de GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [8] WALLACE K. Ecosystem services: multiple classifications or

- confusion[J]. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 353-354.
- [9] BOYD J, BANZHAF S. What are ecosystem services: the need for standardized environmental accounting units[J]. *Ecological Economics*, 2007, 63(2/3): 616-626.
- [10] FISHER B, TURNER R K, MORLING P. Defining and classifying ecosystem services for decision making[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [11] COSTANZA R. Ecosystem services: multiple classification systems are needed[J]. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350-352.
- [12] HAINES-YOUNG R, POTSCHIN M. Proposal for a common international classification of ecosystem goods and services (CICES) for integrated environmental and economic accounting[R]. New York: European Environment Agency, 2010.
- [13] TOBIAS D, MENDELSON R. Valuing ecotourism in a tropical rain-forest reserve[J]. *AMBIO*, 1991, 20(2): 91-93.
- [14] CHOPRA K. The value of non-timber forest products: an estimation for tropical deciduous forests in India[J]. *Economic Botany*, 1993, 47(3): 251-257.
- [15] GREN I M, GROTH K H, SYLVÉN M. Economic values of danube floodplains[J]. *Journal of Environmental Management*, 1995, 45(4): 333-345.
- [16] SUTTON P C, COSTANZA R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 509-527.
- [17] LAL P. Economic valuation of mangroves and decision-making in the Pacific[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2003, 46(9/10): 823-846.
- [18] PATTANAYAK S K. Valuing watershed services: concepts and empirics from Southeast Asia[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104(1): 171-184.
- [19] HEIN L, van KOPPEN K, de GROOT R S, et al. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services[J]. *Ecological Economics*, 2006, 57(2): 209-228.
- [20] GRÉT-REGAMEY A, KYTZIA S. Integrating the valuation of ecosystem services into the Input-Output economics of an Alpine region[J]. *Ecological Economics*, 2007, 63(4): 786-798.
- [21] KOZAK J, LANT C, SHAIKH S, et al. The geography of ecosystem service value: the case of the Des Plaines and Cache River wetlands, Illinois[J]. *Applied Geography*, 2011, 31(1): 303-311.
- [22] 张嘉宾. 关于估价森林多种功能系统的基本原理和技术方法的探讨[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 1982(3): 5-18.
ZHANG J B. A study of the principles and technique of evaluating the multiple function system of forest[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 1982(3): 5-18.
- [23] 侯元兆, 王琦. 中国森林资源核算研究[J]. *世界林业研究*, 1995(3): 51-56.
- [24] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探: 以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 481-484.
XIAO H, OUYANG Z Y, ZHAO J Z, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: a case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 481-484.
- [25] 赵同谦. 中国陆地生态系统服务功能及其价值评价研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [26] 靳芳. 中国森林生态系统服务价值评估研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [27] 张朝晖. 桑沟湾海洋生态系统服务价值评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [28] 于格. 青藏高原草地生态系统服务功能及其价值评估研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2006.
- [29] 岳书平, 张树文, 闫业超. 东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. *地理学报*, 2007, 62(8): 879-886.
YUE S P, ZHANG S W, YAN Y C. Impacts of land use change on ecosystem services value in the Northeast China Transect (NECT)[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(8): 879-886.
- [30] 吴爱林, 陈燕, 燕彩霞, 等. 长江三角洲生态系统服务价值分析及趋势预测[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 254-259.
WU A L, CHEN Y, YAN C X, et al. Ecosystem service value analysis and trend prediction in Yangtze River Delta[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 254-259.
- [31] 孙宝娣, 崔丽娟, 李伟, 等. 湿地生态系统服务价值评估的空间尺度转换研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2607-2615.
SUN B D, CUI L J, LI W, et al. A review of spatial-scale transformation in wetland ecosystem service evaluation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 2607-2615.
- [32] LOCATELLI B, IMBACH P, VIGNOLA R, et al. Ecosystem services and hydroelectricity in Central America: modelling service flows with fuzzy logic and expert knowledge[J]. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(2): 393-404.
- [33] KROLL F, MÜLLER F, HAASE D, et al. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics[J]. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521-535.
- [34] BAGSTAD K J, JOHNSON G W, VOIGT B, et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: a comprehensive approach to quantifying actual services[J]. *Ecosystem Services*, 2013(4): 117-125.
- [35] SERNA-CHAVEZ H M, SCHULP C J E, VAN BODEGOM P M, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 39(2): 24-33.
- [36] YOO J, SIMONIT S, CONNORS J P, et al. The valuation of off-site ecosystem service flows: deforestation, erosion and the amenity value of lakes in Prescott, Arizona[J]. *Ecological Economics*, 2014, 97(1): 74-83.
- [37] VREBOS D, STAES J, VANDENBROUCKE T, et al. Mapping ecosystem service flows with land cover scoring maps for data-scarce regions[J]. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 28-40.
- [38] JORDA-CAPDEVILA D, RODRÍGUEZ-LABAJOS B, BARDINA M. An integrative modelling approach for linking environmental flow management, ecosystem service provision and inter-stakeholder conflict[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2016, 79: 22-34.
- [39] ZANK B, BAGSTAD K, VOIGT B, et al. Modeling the effects of urban expansion on natural capital stocks and ecosystem service flows: a case study in the Puget Sound, Washington,

- USA[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 149: 31-42.
- [40] VIGL L E, DEPELLEGRIN D, PEREIRA P, et al. Mapping the ecosystem service delivery chain: capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 422-436.
- [41] 甄霖, 刘雪林, 魏云洁. 生态系统服务消费模式、计量及其管理框架构建[J]. *资源科学*, 2008, 30(1): 100-106.
ZHEN L, LIU X L, WEI Y J. Consumption of ecosystem services: models, measurement and management framework[J]. *Resources Science*, 2008, 30(1): 100-106.
- [42] 邓妹凤. 榆林市生态系统服务供需平衡研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [43] 郑悦. 北京市典型休闲农业园生态系统服务评估及供需分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [44] 彭建, 杨咏, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区[J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 4562-4572.
PENG J, YANG Y, XIE P, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong Province based on the supply and demand of ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [45] 陈江龙, 徐梦月, 苏曦, 等. 南京市生态系统服务的空间流转[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 5087-5095.
CHEN J L, XU M Y, SU X, et al. Spatial transfer of regional ecosystem service in Nanjing City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 5087-5095.
- [46] 韦妮妮. 城市湿地生态系统服务的空间流转过程研究: 以泉州湾河口湿地为例[D]. 泉州: 华侨大学, 2014.
- [47] 乔旭宁, 张婷, 杨永菊, 等. 渭干河流域生态系统服务的空间溢出及对居民福祉的影响[J]. *资源科学*, 2017, 39(3): 533-544.
QIAO X N, ZHANG T, YANG Y J, et al. Spatial flow of ecosystem services and impacts on human well-being in the Weigan River Basin[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 533-544.
- [48] 蒋毓琪, 陈珂. 浑河流域上游森林生态服务空间流转价值及其对沈阳城市段供水量影响的通径分析[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(6): 285-290.
JIANG Y Q, CHEN K. Path analysis on impacts of forest ecological service value transfer in upstream of Hunhe River Basin on water supply in Shenyang City cluster[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(6): 285-290.
- [49] 刘慧敏, 刘绿怡, 任嘉衍, 等. 生态系统服务流量化研究进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2723-2730.
LIU H M, LIU L Y, REN J Y, et al. Progress of quantitative analysis of ecosystem service flow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2723-2730.
- [50] BEKELE E G, NICKLOW J W. Multiobjective management of ecosystem services by integrative watershed modeling and evolutionary algorithms[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(10): W10406.
- [51] NAIDOO R, BALMFORD A, COSTANZA R, et al. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9495-9500.
- [52] BENNETT E M, PETERSON G D, GORDON L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [53] BRADFORD J B, D'AMATO A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [54] BUTLER J R A, WONG G Y, METCALFE D J, et al. 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[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 180: 176-191.
- [55] MEEHAN T D, GRATTON C, DIEHL E, et al. Ecosystem-service trade offs associated with switching from annual to perennial energy crops in riparian zones of the US Midwest[J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): e80093.
- [56] CASTRO A J, VERBURG P H, MARTÍN-LÓPEZ B, et al. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: a landscape-scale spatial analysis[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 102-110.
- [57] SEGURA M, MAROTO C, BELTON V, et al. A new collaborative methodology for assessment and management of ecosystem services[J]. *Forests*, 2015, 6(5): 1696-1720.
- [58] LANGEMEYER J, GÓMEZ-BAGGETHUN E, HAASE D, et al. Bridging the gap between ecosystem service assessments and land-use planning through Multi-Criteria Decision Analysis(MCDA)[J]. *Environmental Science and Policy*, 2016, 62: 45-56.
- [59] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响: 以密云水库流域为例[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
LI Y F, LUO Y C, LIU G, et al. Effects of land use change on ecosystem services: a case study in Miyun Reservoir Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 726-736.
- [60] 杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 等. 关中—天水经济区生态系统服务的权衡关系[J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1762-1773.
YANG X N, LI J, QIN K Y, et al. Trade-offs between ecosystem services in Guanzhong-Tianshui Economic Region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1762-1773.
- [61] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078.
WANG P T, ZHANG L W, LI Y J, et al. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the Upper Reaches of Hanjiang River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [62] 陈登帅, 李晶, 杨晓楠, 等. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 3260-3271.
CHEN D S, LI J, YANG X N, et al. Trade-offs and optimization among ecosystem services in the Weihe River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3260-3271. ⊗