

生态系统服务地理学

The Geography of Ecosystem Services

李双成 等 / 编著



科学出版社

生态系统服务地理学

The Geography of Ecosystem Services

李双成 等 / 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书首先界定了生态系统服务地理学的学科内涵、研究范畴和研究议题,阐述了生态系统服务的分类与分区、空间结构、流动和尺度效应,论述了生态系统服务与气候变化、土地利用/土地覆被变化的关系,并用国外案例对生态系统服务空间制图过程与可视化方法进行了解释。其次,建构了北京市社会经济系统的可计算一般均衡化模型,模拟了生态系统服务与区域人类福祉耦合关系。通过制定不同的政策情境,对京津冀地区的多种生态系统服务进行了权衡与协同分析,并提出了相应的管理对策。在总结国内外实践案例的基础上,对生态系统服务付费的理论及应用途径进行了归纳。最后,介绍了两种生态系统服务研究常用的模型与工具。

本书适合地理学、生态学、环境科学和经济学等专业的科研和教学人员阅读,可作为高等院校和科研院所相关专业的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

生态系统服务地理学 / 李双成等编著. —北京: 科学出版社, 2014. 5

ISBN 978-0-03-040532-6

I. 生… II. 李… III. 生态地理学-研究 IV. Q15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 088746 号

责任编辑: 李 敏 王 倩 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 李姗姗

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 5 月第一次印刷 印张: 23 1/2 插页: 2

字数: 600 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



国家自然科学基金重点项目

“生态系统服务与区域社会福祉耦合机制研究：
基于地理学综合分析的途径”（41130534）成果

《生态系统服务地理学》

编写组成员

组长 李双成

成员 (以姓氏笔画为序)

马 程 王 阳 王 珏 朱文博 刘金龙

李晓静 李 琰 张 津 高 阳

前 言

目前,生态系统服务已成为生态学、地理学、环境科学和经济学等学科的研究热点,国内外已有大量的研究成果面世。回顾研究历程,可以发现,生态系统服务研究已经超越单纯的价值评估和资产核算阶段,朝着深度解析生态系统服务与社会经济系统耦合关系方向演进。由于这种耦合关系跨越自然科学和社会科学两大领域,且具有空间异质性、动态演进性和尺度依存性等非线性特征,倚重单一的学科难以达到研究目标,因而构建多学科或跨学科的生态系统服务科学研究体系势在必行。在此过程中,兼具综合性和区域性特质且具有“3S”[遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)]信息获取与空间分析利器的地理学必将发挥重要作用。

尽管作者较早地意识到地理学应当且能够在生态系统服务研究中起到关键作用,并在20世纪末参加郑度院士作为首席科学家的国家重点基础研究发展计划(973计划)“青藏高原形成演化及其环境、资源效应”时有过一定的探索和尝试,但认知过于肤浅,成果寥寥。近年来生态系统服务研究的转向,尤其是生态系统服务研究级联框架的建立,给地理学深度参与其中带来了上佳的机遇,地理学的绝大多数分支学科都可以在其中谋得适当的研究位置和议题。传统上,地理学将人地关系及其地域系统作为研究核心,然而不将抽象的人地关系具象化,研究过程便无处着力,成果自然难以令人满意。我们认为,生态系统服务与人类福祉耦合关系恰可成为人地关系具象化的表征物。因为生态系统服务作为自然提供给人类的效能和福利,直接关系到人类社会的生存与发展;反过来,人类通过各种活动对生态系统服务的类型、数量和质量产生影响。重要的是,生态系统服务与人类福祉的双向作用过程可以定量测度和模拟,这就把抽象的人地关系转换成实实在在的研究命题。量化的生态系统服务成为人地关系具象化的表征物,仍有较大的探索空间,相信将会有越来越多的地理学者认识到这一点。

基于上述认识,近年来笔者极力倡导加大从地理学途径研究生态系统服务的力度,并多次撰文阐述这一观点。2011年,我们荣幸地获得了国家自然科学基金重点项目“生态系统服务与区域社会福祉耦合机制研究:基于地理学综合分析的途径”(41130534)的资助,这使我们更有条件来推进生态系统服务研究的地理化进程。如今,奉献给读者的拙作——《生态系统服务地理学》,便是基金项目执行两年多来这方面工作的总结。

首先,本书界定了生态系统服务地理学的学科内涵、研究范畴和研究议题,分别论述了生态系统服务的分类与分区、空间结构、流动和尺度效应,分析了生态系统服务与气候变化、土地利用/土地覆被变化的关系,并用国外案例对生态系统服务空间制图过程与可视化方法进行了阐述;其次,在生态系统服务与人类社会关系方面,用CGE模型模拟了生态系统服务与区域人类福祉耦合关系,通过制定不同情境,进行了生态系统服务的时空权衡分析,提出了相应的管理对策,使用国内外的实践案例,对生态系统服务付费的理论及应用途径进行了总结;最后,介绍了目前常用的生态系统服务研究的模型与工具。本书

凝结了众多人的智慧和辛劳。全书由各位作者分头编写，李双成统稿。在确定初稿提纲和组织写作过程中，赵志强做出了较大贡献，刘娅在文字校对和参考文献编排方面付出了许多心血，谨表谢忱！

各章内容及完成者如下：

第一章 绪论：李双成

第二章 生态系统服务分类与分区：马程、李琰

第三章 生态系统服务空间结构、流动和尺度效应：王珏、李双成

第四章 土地利用/土地覆被变化与生态系统服务：李晓静、李双成

第五章 气候变化与生态系统服务：李琰

第六章 生态系统服务的时空权衡与管理政策：刘金龙

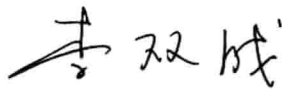
第七章 生态系统服务与区域人类福祉耦合关系：高阳

第八章 生态系统服务付费：理论与案例：朱文博

第九章 生态系统服务制图与可视化：王阳

第十章 生态系统服务模拟模型与工具：张津、刘金龙

本书是从地理学视角研究生态系统服务的一次尝试。在编写过程中，引用了国外一些学者的研究成果，在书中已做标注。对这些学者的杰出工作，致以崇高的敬意。由于书中的一些内容具有很强的探索性，故难免有不妥甚至谬误，祈望读者不吝珠玉，慷慨赐教。



2014年3月于北大燕园

目 录

第一章 绪论	1
第一节 生态系统服务研究的历史过程及趋势	1
第二节 生态系统服务地理学出现的科学背景与社会需求	12
第三节 生态系统服务地理学的学科界定	15
第二章 生态系统服务分类与分区	26
第一节 主要的生态系统服务分类方案	26
第二节 基于人类福祉视角的生态系统服务分类方案	39
第三节 地理学视角的生态系统服务分类设想	42
第四节 生态系统服务的地域分异特性	44
第五节 生态系统服务分区的技术与方法	49
第六节 案例：京津冀地区生态系统服务分区	57
第三章 生态系统服务空间结构、流动和尺度效应	64
第一节 生态系统服务的空间结构	64
第二节 生态系统服务的空间流动与测度	78
第三节 生态系统服务尺度特征及其推绎方法	95
第四章 土地利用/土地覆被变化与生态系统服务	115
第一节 土地利用/土地覆被变化与生态系统服务的关联	115
第二节 LUC 对生态系统服务脆弱性的影响	139
第五章 气候变化与生态系统服务	148
第一节 气候因素与生态系统服务的关系	148
第二节 气候变化情景下生态系统服务的动态	161
第三节 气候变化下生态系统服务管理的适应对策	166
第六章 生态系统服务的时空权衡与管理政策	172
第一节 生态系统服务的空间权衡及其原因	172
第二节 生态系统服务时空权衡的测度与表达	179
第七章 生态系统服务与区域人类福祉耦合关系	200
第一节 基于人类福祉的生态系统服务概念框架	200
第二节 生态系统服务对人类福祉的影响	205
第三节 基于 CGE 模型的生态系统服务与区域人类福祉耦合关系模拟	212
第八章 生态系统服务付费：理论与案例	236
第一节 生态系统服务付费的概念与理论	236
第二节 生态系统服务付费项目的属性特征	241
第三节 生态系统服务评估与付费标准量化	249
第四节 生态系统服务付费效率的诊断框架及案例	259

第九章 生态系统服务制图与可视化	267
第一节 生态系统服务制图的研究进展	267
第二节 生态系统服务制图规范	275
第三节 制图案例——西南昆士兰地区的生态系统服务制图	281
第十章 生态系统服务模拟模型与工具	295
第一节 生态系统服务研究中的模型与方法	295
第二节 InVEST 模型	299
第三节 ARIES: 一种生态系统服务建模方法	313
参考文献	325
有关生态系统服务研究的几个问题	364

第一章 绪 论

第一节 生态系统服务研究的历史过程及趋势

一、生态系统服务及其研究的重要性

生态系统服务是指生态系统所形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用 (Daily, 1997), 为人类直接或间接从生态系统得到的所有收益 (Costanza et al., 1997)。生态系统的能流、物流和信息流等生态过程产生的生态系统功能是生态系统服务的基本来源, 而人类不同层次的需求则是生态系统服务形成的基本驱动力。以生态系统服务为主体构成的自然资本对人类社会福祉产生重要影响, 其效能既包括为人类生存与发展提供所需的食物、淡水和生产生活原材料等基础服务, 也包括愉悦人类精神文化层面的高级服务, 更包括维系地球系统正常演进的环境支撑服务。因而, 生态系统服务是人类赖以生存和发展的资源与环境基础 (傅伯杰等, 2009)。

随着人类社会对自然生态系统控制力的不断提高, 为满足不断增长的物质和精神需求, 人类对生态系统的直接和间接作用显著增加, 表现为对生态系统类型的广泛替代或转换, 对生态系统结构与功能的强烈干预, 对生态系统服务的过度消费等。据千年生态系统评估结果 (MA, 2003), 地球自然生态系统每年提供价值约 15 万亿英镑的产品, 如新鲜的水、清洁的空气和鱼等, 但是人类活动破坏了大约 2/3 提供上述产品的生态系统, 包括湿地、森林、园地、河流和海岸等。目前, 地球上 24 个生态系统中的 15 个正在持续恶化。大约 60% 的人类赖以生存的生态系统服务持续下降, 如饮用水供应、渔业、区域性气候调节以及自然灾害和病虫害控制等, 并且这种退化趋势在 21 世纪上半叶可能会更加恶化。生态系统服务的退化不仅危及当代人类社会的福祉, 而且将极大地削减人类后代从生态系统所获取的利益。在全球气候变化和人类活动的双重作用下, 生态系统功能的下降和退化, 将引起人类生存环境无可挽回的逆转 (Vitousek et al., 1997)。

从科学发展角度分析, 过度消费生态系统服务, 引起生态系统功能下降、生境恶化的原因是多方面的。从环境伦理学看来, 是人类的价值观出现了偏差; 从经济学角度看, 是生态系统服务的外部性无法限制人类的无节制利用行为; 从生态学角度看, 是生态系统结构—功能—服务之间的内在机制与联系没有厘清; 从地理学角度讲, 是生态服务功能的承载力及其时空格局与区域社会经济没有得到优化配置所致。社会需求极大地刺激了科学研究, 生态系统服务研究已成为国际生态学和和相关学科研究的前沿和热点 (傅伯杰等, 2009; 李文华等, 2008, 2009)。千年生态系统评估 (MA) 更是提出: 生态系统和生态系统服务与人类福祉关系的研究将成为现阶段生态学研究的核心内容, 并引领 21 世纪生态

学发展的新方向 (MA, 2003)。2006 年英国科学家和决策者把 100 个生态问题分成 14 个主题, 其中第一个主题就是生态系统服务 (Sutherland et al., 2006)。在随后确定的有关保护全球生物多样性的 100 个重要问题中, 同样把生态系统服务议题列在首位 (Sutherland et al., 2006)。这说明了生态系统服务科学研究的极端重要性。

二、生态系统服务研究的历史过程

对于生态系统给人类提供服务的认知最早可以追溯到公元前 400 年的柏拉图 (Plato, 约公元前 427 ~ 前 347)。他认为地球系统是一个巨大的活生物体, 森林砍伐可以导致土壤侵蚀和春季干旱。一般认为, 现代生态系统服务的理念来自于马什 (Marsh), 他在 1864 年出版的《人与自然》(*Man and Nature*) 一书中, 通过大量资料和数据对欧洲和美国自然环境的过去与现状进行了比较分析, 指出农业生产将会导致湿地和森林面积减少、物种灭绝、沙漠化加剧以及气候变化。他认为, 人类如果不改变把地球当作消费对象的观念, 那么地球将会被毁灭, 人类文明亦将不复存在。然而, 他对人类活动及其效应的劝诫与警示, 并没有引起当时社会的重视。究其原因, 一方面是当时人类活动给自然生态系统带来的负面效应还没有大规模、高强度出现, 人类还没有检视自身行为的紧迫感; 另一方面, 当时的科学认知水平对于自然环境的功能还不能有更加全面的认识和评价。到了 20 世纪 40 年代末, 西方国家的环境问题集中爆发, 环境保护运动兴起, 对于自然环境作用的认识和评价起到了积极的推动作用。

自从 1869 年赫克尔 (Haeckel, 1834 ~ 1919) 创建生态学以来, 生态科学得到迅速发展。尤其是 1935 年坦斯黎 (Tansley, 1871 ~ 1955) 提出“生态系统”概念后, 这一术语逐渐被生态学及其相关科学的科学家共同体所接受, 并应用到自身的研究领域中。Fairfield Osborn 强调了生态系统及其生境条件尤其是水、土壤、植物与动物对人类文明续存的作用 (Osborn, 1948)。Vogt 首先提出“自然资本”的概念 (Vogt, 1948), 他指出, 若耗竭自然资源资本, 就会降低美国偿债能力。利奥波德 (Aldo Leopold, 1887 ~ 1948) 在《沙乡年鉴》中指出, 土壤“不仅仅是由沙石、淤泥和泥土构成的, 它是活的生命系统, 起着多种作用: 它是过滤器和缓冲器, 它能分隔水域, 储存并释放碳, 它能加速氮和其他养分的形成, 它是多种生命生存之地” (Leopold, 1949)。利奥波德还认为, 只以物种的经济价值为衡量标准而忽视自然整体价值的保护是无意义的, 真正意义上的生态保护应该建立在大地的稳定性、多样性及复杂性的基础上, “必须首先作为一种对大地共同体的义务而得到激发, 而不是一种获得利润的手段 (Leopold, 1949)”。在这一时期, Sears 则对生态系统消解废弃物和养分循环等功能予以关注 (Sears, 1956)。

与生态系统服务相近的“环境服务功能”概念首先由关键环境问题研究组 (Study of Critical Environmental Problems, SCEP) 提出。1970 年, 该研究项目在报告 *Man's Impact on the Global Environment* 中首次使用“Service”一词 (SCEP, 1970), 书中列举的“环境服务”功能包括害虫控制、昆虫传粉、渔业、土壤形成、水土保持、气候调节、洪水控制、物质循环与大气组成等方面。实际上, 20 世纪 60 年代, King 和 Helliwell 分别在其著作 *Wildlife and Man* (King, 1966) 和 *Valuation of Wildlife Resources* (Helliwell, 1969) 中就都

提到了“野生生物的服务”(wildlife service)。Holdren 和 Ehrlich 分析了生态系统在土壤肥力与基因库维持中的作用,并讨论了生物多样性丧失对生态系统功能的影响(Holdren and Ehrlich, 1974)。经过多位学者的发展和补充, P. R. Ehrlich 和 A. Ehrlich (1981) 正式将生态系统对于人类社会的影响及其效能确定为“生态系统服务”(ecosystem services)。

在科学研究上,真正具有生态系统服务研究里程碑意义的当属 Daily (1997) 和 Costanza 等 (1997) 的工作。Daily 1997 年在 *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems* 一书中,系统介绍了生态系统服务的概念、研究历史、价值评估以及不同生态系统类型和区域的服务功能等内容,并将生态系统服务定义为:生态系统及其生态过程所形成与维持的人类赖以生存的环境条件与效用。主要包括:生态系统的产品生产、气候气象的调节和稳定、生物多样性的产生和维持、旱涝灾害的减缓、废弃物的解毒与分解、土壤的保持及其肥力的更新、农作物和自然植被的授粉及其种子的传播、空气和水的净化、病虫害爆发的控制、物质循环的保持、人类文化的发育与演化、人类感官心理和精神的益处等方面(Daily, 1997)。1997 年, Costanza 等在 *Nature* 发表的 *The value of the world's ecosystem services and natural capital* 一文是生态系统服务价值评估的圭臬之作。他们将生态系统服务定义为人类直接或间接从生态系统得到的所有收益,包括生态系统所提供的商品和服务,可细分为气体调节、气候调节、干扰调节、水调节、水供应、侵蚀控制和沉积保存、土壤形成、营养循环、废物处理、授粉、生物控制、庇护、食物生产、原料、遗传资源、娱乐、文化等,并根据多种价值评估方法,核算出全球生态系统服务年度价值为 16 万亿~54 万亿美元,平均价值为 33 万亿美元,相当于同期全世界国民生产总值(GNP)约 18 万亿美元的 1.8 倍。其中,海洋生态系统服务价值约占 63% (20.9 万亿美元),陆地生态系统服务价值约占 37% (Costanza et al., 1997)。在 ISI Web of Knowledge 中以“ecosystem services”作为关键词检索,2013 年 1~5 月(截止到 5 月 10 日)共检索到 402 篇文献。其中,参考文献中引用 Costanza 等 1997 年 *Nature* 这篇文献的计有 51 篇,占 12.7%,名列第一位;引用 Daily 1997 年著作的共计 18 篇,占 4.5%,名列第三位。由此可以说明,这两篇文献在生态系统服务研究中占有重要地位。

2001~2005 年实施的 MA 计划,把生态系统服务研究推向了高潮。MA 对生态系统服务功能的定义是:“人类从生态系统获得的效益。”其中,包括供给功能、调节功能、文化功能以及支持功能。供给功能是指生态系统为人类提供各种产品如食物、燃料、纤维、洁净水,以及生物遗传资源等的效益;调节功能是指生态系统为人类提供诸如维持空气质量、调节气候、控制侵蚀、控制人类疾病,以及净化水源等调节性效益;文化功能是指通过丰富精神生活、发展认知、休闲娱乐,以及美学欣赏等方式而使人类从生态系统获得的非物质效益;支持功能是指生态系统生产和支撑其他服务功能的基础功能,如初级生产、制造氧气和形成土壤等。MA 认为,生物多样性和生态系统具有内在价值,人类在进行与生态系统有关的决策时,既要考虑人类福祉,同时也要考虑生态系统的内在价值;在人类与生态系统之间存在一种动态的相互作用,人类的变化状况直接或间接影响着生态系统的变化,同时生态系统的变化又引起人类福祉的变化。MA 尤其关注生态系统服务与人类福祉之间的联系。在 MA 的概念框架中,人类福祉是评估的核心内容。MA 的工作主要回答:①生态系统服务的变化是怎样影响人类福祉的?②在未来数十年中,生态系统的变化可能

给人类带来什么影响? ③人类在区域、国家和全球尺度上采取什么样的对策才能改善生态系统的管理从而提高人类的福利和消除贫困? 通过回答上述问题, 旨在综合评估生态系统变化对人类福祉的影响, 提出加强生态系统保护以满足人类需求方面的行动对策等 (MA, 2003, 2005)。同样, 在 402 篇文献 (检索条件与上文相同) 中, 引用 2005 年 MA 著作的共计 29 篇, 占 7.2%, 居第二位, 这也说明 MA 对于生态系统服务研究工作的影响力。

三、生态系统服务研究进展

1997 年 Daily 和 Costanza 的研究成果发表后, 国内外出现了生态系统服务研究的热潮, 有大量的文章和研究报告面世 (图 1-1)。总结和评述在这一领域十多年研究所取得的成果, 对于指引未来的发展方向具有重要意义。

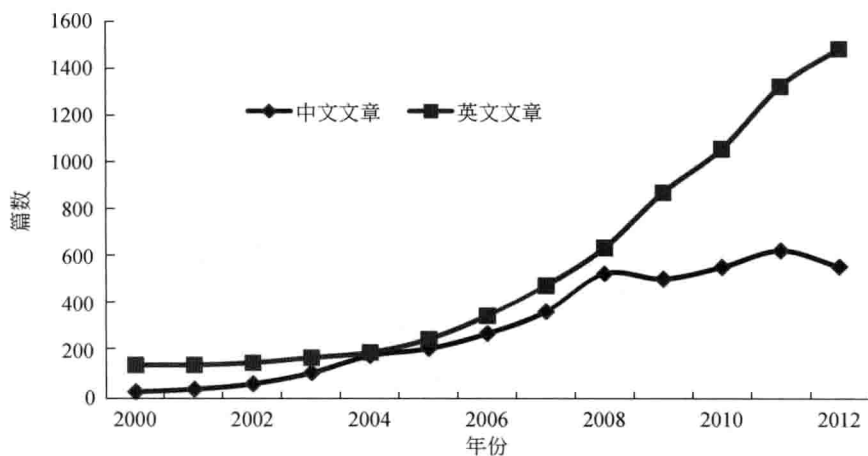


图 1-1 2000 ~ 2012 年国内外生态系统服务研究发展趋势
中文文章以“生态系统服务”作为关键词在 CNKI 检索, 英文文章以“ecosystem services”
作为关键词在 Web of Knowledge 检索。时间段: 2000. 01. 01 ~ 2012. 12. 31

(一) 国外研究现状和最新进展

1. 生态系统服务的分类

生态系统服务分类是价值评估及其应用的基础。早期权威的分类系统是由 Daily (1997) 和 Costanza 等 (1997) 完成的, 前者将生态系统服务归为 13 类, 而后者则分为 17 类。这些分类系统成为 20 世纪末 21 世纪初生态系统服务价值评估的重要依据。目前, 应用最为广泛的是千年生态系统评估 (MA, 2003) 提出的, 将生态系统服务分为供给、调节、文化和支持服务四类。目前, 对于生态系统服务的分类仍然有不同的看法。Wallace (2007) 认为, 由于对一些关键概念如生态系统过程、功能和服务界定不清, 现有的分类系统将实现服务的过程 (途径和手段) 与服务本身 (终极目标) 混合在一起, 限制了它们的应用范围。据此, 他提出了一个用于自然资源管理的分类系统, 在这个系统中, 生态服务功能被分为以下几类, 即充足的资源, 良好的物理和化学环境, 天敌、疾病和寄生虫

的防护, 以及社会文化满足与实现。响应 Wallace 的提法, Fisher 和 Turner (2008) 提出以中间服务、终点服务和收益来建构起联结生态系统服务和人类福祉联系的概念框架。Costanza (2008) 提出了辩护性解释, 并给出了 Wallace 系统没有包容的两个分类系统, 即依据空间特征的分类和依据排他性和竞争性的分类, 前者将生态系统服务分为 5 类, 包括全球非空间位置依存的服务、局部空间位置依存的服务、与方向相关的服务流、原位的服务、与用户迁移有关的服务, 后者则依据排他性/非排他性和竞争性/非竞争性二维矩阵将生态系统服务归为 4 类。最近, 欧洲环境署 (European Environment Agency, EEA) 提出了一个满足人类福祉的国际生态系统服务分类方案 (Common International Classification of Ecosystem Services, CICES), 将生态系统服务分为供给服务、调节与维持服务、文化服务三大类 (Haines-Young and Potschin, 2013)。事实上, 由于生态系统结构复杂性和功能的多样性, 很难找到一个普适的生态系统服务分类方案, 但一个较好的方案应当包括生态系统功能和服务特征, 同时又便于决策使用 (Fisher et al., 2009)。

2. 生态系统服务之间的相互作用与联系

从供需双方来分析, 除了人类的选择偏好外, 生态系统服务类型及其驱动因素的多样性也是权衡形成的原因。生态系统对人类福祉提供的服务是多重的, 并且各种服务之间相互作用相互联系。在管理生态系统服务时最大的挑战在于它们相互交织在一起, 并且相互作用的关系是高度非线性的 (Farber et al., 2002; Van Jaarsveld et al., 2005)。加强对生态系统功能非线性的理解和量化水平的提升, 将能提供更实际的生态服务价值评估, 改善基于生态系统的管理实践 (Barbier et al., 2008)。因此, 近来的研究提倡关注对生态系统服务的多重和非线性关系背后的理论解释 (Bennett et al., 2009; Carpenter et al., 2009)。对于一些特定的生态系统, 已经发现了生态系统服务之间的一些相互关联。例如, 通过 400000 km² 的森林调查, 发现了云杉、松树、桦木、山杨、栎树以及山毛榉等树种丰富度与生物量、碳储存、林果生产以及狩猎产品等之间存在正的相关关系。但是, 没有一个单一的树种能够维系这些生态系统服务之间的关系, 而且生态系统服务之间存在着权衡, 如生物量与枯立木、林果生产和狩猎之间 (Gamfeldt et al., 2013)。然而, 对于生态系统功能和服务之间关系的理解, 仍然相当模糊。因此, 尚不清楚权衡的时间和数量以及它们之间的相互作用, 同样对引起这些问题的机制, 如何将权衡的成本最小化, 如何加强协同效应等方面缺乏认识。

在研究方法方面, Bennett 和 Balvanera 提出了一个依据不同生态系统服务之间驱动力和相互作用的分类体系, 目的在于更好地理解多重生态系统服务之间的联系以及这些联系背后的机制 (Bennett and Balvanera, 2007)。研究发现几个独立的特征可同时影响多重服务传递, 而单一服务常常依赖于多重特征, 由此产生了特征的关联和服务的集聚。通过评述 247 个研究案例, 提出使用生态系统的功能特征来评价多重生态过程和服务 (De Bello et al., 2010)。目前, 研究生态生态系统服务多重关系的关联与整体特征时常用相关和聚类分析方法, 目的在于将其归并为更加简明的生态系统服务簇 (Raudsepp-Hearne et al., 2010)。

3. 生态系统服务之间的权衡与协同

所谓权衡 (trade-offs) 是指某些类型生态系统服务的供给由于其他类型的生态系统服

务使用的增加而减少的状况。协同 (synergies 或 co-benefits) 是指两种或多种生态系统服务同时增强的情形。由于人口的增加和生活水平的提高, 人类对生态系统服务需求不断增加。人们常常通过改造生态系统来增加其提供能力, 如转换生态系统类型、减少自然生态系统面积或向生态系统投入更多的人为辅助能量等, 其结果往往是牺牲一些服务来使另外一些服务的供给能力得以提高。比如, 在山地农业区, 开垦坡地种植农作物, 粮食产量的提高是通过增大土壤侵蚀的风险取得的。按照目前趋势发展, 人类对生态系统服务的需求将超过地球所能提供服务的能力。尽管供给服务有所增加, 但过去 50 年大多数其他类型服务都呈现下降趋势, 调节服务功能的下降速率尤其显著。生态系统功能的退化和提供服务能力的下降不仅危及当代人类社会的福祉, 而且将极大地削减人类后代从生态系统所获取的利益, 人类社会正面临着前所未有的挑战。

在权衡类型研究上, 现在普遍认为有 3 种形式的权衡, 即空间权衡、时间权衡和可逆性权衡 (Rodríguez et al., 2006)。空间权衡是指区域间生态系统服务的相互消长。例如, 某区域试图保持和提高一种服务的供给 (如食物等), 引起了另一区域很多生态系统服务的大幅下降。时间权衡是指现时的生态系统服务利用对未来造成的可能影响。例如, 短期为追求经济利益增加粮食产量而使用的化肥和农药等措施, 会引发土地长期的调节和支持功能间的权衡。可逆性权衡是指在可逆性恢复和不可逆性变化之间找到平衡点。另外, 根据两种生态系统服务在二维坐标体系构成的曲线特征, 权衡关系可以归纳为无相互关联、直接权衡、凸权衡、凹权衡、非单调凹权衡以及反 S 形权衡等 (Lester et al., 2013)。

在权衡与协同的影响因素上, 通常认为人们最容易感受到的是供给服务, 但 Martín-López 等通过一项 3379 份的面对面问卷调查表明, 个体对于与之生活密切相关的环境调节服务如空气净化等感知最深, 而正规教育、环境行为和性别变量是影响人们认识生态系统提供服务能力的重要因素 (Martín-López et al., 2012)。Bryan 的研究发现, 市场激励政策和措施如商品市场、碳税、水总量管制与交易、生物多样性拍卖、生物质能源市场化等可通过土地利用的传导作用最终影响生态系统服务的权衡与协同 (Bryan, 2013)。

在权衡的研究方法上, 目前常用的主要有图形比较、情景分析及模型模拟等。其中, 图形比较是通过对每一生态系统服务类型进行空间制图, 然后应用 GIS 工具进行叠加等空间分析, 比较其空间重合度, 最终识别权衡与协同的类型及区域。例如, Chan 等通过 GIS 空间分析发现, 在生物多样性保护优先地区和美国加利福尼亚州中心海岸生态区的 6 个生态服务功能供应区之间只有较弱的相关性 (Chan et al., 2006)。情景分析是目前权衡与协同研究最为常见的一种方法, 通过设定若干生态保护或社会经济发展优先或兼顾的情景, 来分析各种生态系统服务之间的动态变化。例如, Alcamo 等通过设定 4 种不同情景进行模拟分析, 表明 21 世纪不同生态系统服务之间此消彼长的关系日益加剧 (Alcamo et al., 2005)。模型模拟途径是指通过机理或统计模型计算出不同生态系统服务的物理量, 然后进行权衡与协同分析。例如, White 等利用一个空间详尽的权衡分析模型对美国马萨诸塞州的近海风能、商业捕鱼、鲸鱼观赏 3 个部门的生产活动的净现值和空间分布进行了分析, 模型模拟的结果清晰地展示了不同部门间的权衡。通过逐步权衡的策略, 得到了一个既能避免渔业和鲸鱼观赏部门收入减少, 又能增加能源部门收入的规划方案 (White et al., 2012)。

4. 生态系统服务的形成与影响机制

整体而言,从生态系统功能到生态系统服务的形成与转换不仅依赖于生态系统特征,而且也受到社会经济特征的影响,如个体与群体的认知、生态知识、经济发展水平以及管理实践等(Andersson et al., 2007)。然而,生态系统服务的形成机制尚不十分清楚。以生物多样性与生态系统服务关系为例,一些学者声称找到了两者关系的证据,如 Balvanera 等(2006)认为生物多样性总体上对生态系统服务有积极影响。生物多样性的损失往往意味着可以影响到生态系统的功能和服务(Hector and Bagchi, 2007)。以海洋为例,生物多样性丧失,资源不断匮乏,恢复潜力、稳定性和水质呈指数降低;而恢复生物多样性能平均提高4倍生产力、降低21%的变异性(Worm et al., 2006)。然而,生物多样性影响生态系统服务尚缺乏有力证据。很多情形下,两者的关系是与特定地点联系在一起的,并且结果与研究分区有关(Andersson et al., 2007)。因此,通过生物多样性管理来调控生态系统服务尚需谨慎,且难以制定一个普适的生物多样性策略(Anderson et al., 2009)。

由于生态系统服务依赖于不同空间和时间尺度上的生态与地理系统过程,因而不论是生态系统服务的供给和消费都存在着尺度效应(Kremen, 2005)。研究集中在:确定生态系统过程和服务的特征尺度,即典型的范围范围和持续时段(MA, 2005);不同尺度下生态系统功能的转换;同一尺度下不同生态系统服务的相互关系;扰动情形下生态系统服务及其脆弱性的多尺度特征(Petrosillo et al., 2010);管理措施与生态系统服务的尺度匹配等方面(Gabriel et al., 2010)。从生态系统服务的空间权衡来说,由于不同生态系统服务供给与需求在空间上不一致,生态系统服务的空间转移会导致不同层次利益相关方对服务的权衡与协同的不同认识。例如,上中下游对于河流在水源涵养、水质净化、土壤保持、灌溉、防洪、航运等方面的权衡与协同。不同尺度利益相关方对于生态系统服务需求的短期与长期利益差异,也会引起权衡与协同效应(Rodríguez et al., 2006)。

关于生态系统服务之间动态关系的特征,我们认为,生态系统服务之间非线性动态关系的形成有自然因素和人为因素两个方面的作用。即使没有人为干预,自然生态系统服务之间关系也会受到内外两方面的作用力从而发生变化,前者如气候变化、生物入侵等,后者是生态系统内在的演替过程。自然因素引起的生态系统服务之间的此消彼长,是一种竞争而非权衡关系;人类社会根据自身需求和价值伦理对生态系统施加的选择性干预引起的生态系统服务之间的动态变化,是为权衡与协同,驱动力通常包括市场化的激励措施、政策和利益相关方的偏好等(李双成等, 2013)。

5. 生态系统服务评估的空间制图

为了有效管理生态系统和进行生物多样性保护,需要对生态系统服务进行空间制图,最近大量研究采用GIS分析测度生态因子对于一定服务功能供给的贡献(Beier et al., 2008; Nelson et al., 2009; Nemeček et al., 2013)。Naidoo等(2008)以0.5°的空间分辨率图示了碳汇、碳储存、草地畜牧业生产和水供应等四种全球生态系统服务的地理分布。在区域尺度上,Egoh等(2009)对南非五种生态服务功能(地表水供给、水流调节、土壤聚积、土壤保持以及碳储存)进行了制图以评价它们之间的关系。Leh等(2013)构建了一系列指

数用于评价土地利用/覆被变化对于径流产生、碳储存、养分保持和泥沙调节等生态系统服务的影响，并图示了各项指数 2005 年和 2009 年相对于 2000 年的变化格局。除了对生态系统服务的供给空间表达外，服务的消费空间格局的制图需求也被逐渐认识到（Burkhard and Kroll, 2010; Burkhard et al., 2012）。生态系统服务的供给与需求制图是复杂的，因为生态系统服务的供给和利用常常在不同的时空尺度上发生变化。尽管生态系统服务的“空间流动问题”已经得到认同，但如何超越“静态图”方式，考虑生态系统服务的跨尺度流动对于不同地域社会经济的影响还存在一些难题（Tallis and Polasky, 2009）。

6. 生态系统服务与社会福祉的关系

理解从局部到全球尺度多个变化的驱动力作用下的生态系统服务和人类福祉动态关系，对于科学管理生态系统，实现区域可持续发展具有重要意义（Carpenter et al., 2009）。相关研究的主题集中在如何把生态系统服务应用于资源利用、生态系统管理、生物多样性保护、区域可持续发展以及减少贫困等项议题。Bryan 等（2010）使用多目标决策分析构建了多利益主体的自然资本和生态系统服务框架来确定区域环境管理的战略优先目标；Chapin III 等（2009）将人类活动和生态系统服务之间的社会-生态相互依存关系作为生态系统管理的基本导向；Mäler 等（2008）提出核算生态系统服务作为可持续发展的表征，并认为将来生态系统服务核算的策略应当将关键生态系统包含在核算框架中，尽可能建立动态评估框架和选择合适的评估技术，尽可能标准化不同生态系统评估方法。生态系统服务与区域贫困化问题密切相关，因为贫困人口生计更多地依赖于自然资源和环境。Comim 等（2009）以贫困化作为人类福祉的代用指标，分析了贫困与生态系统服务之间的联系。Tschakert（2007）则通过一个小尺度实证案例说明如何将生态系统服务（增加碳汇）转化为扶贫的具体项目，用于促进当地居民收入的增加，进而摆脱贫困。在生态系统服务与社会福祉关系研究上，以下一些议题是值得关注的（Carpenter et al., 2009），如土地利用变化、营养流动、种类构成和气候变化怎样影响生态系统服务流？人类的选择和行为怎样影响生态系统服务的局部流动，并且对其他区域产生溢出效应？什么样的管理机构、刺激政策和调节措施在维持生态系统服务流中是有效的？然而，生态系统服务与人类社会福祉之间的关系是复杂的，一些区域生态系统服务在下降，而人类福祉水平却在提高；另外一些地方的情况可能正好相反。这其中，可能有研究尺度的问题，也有可能是区域差异造成的，也很有可能是对于两者之间关系错误理解和不当测度导致。因此，理解和精准表达生态系统服务与人类社会福祉之间的关系仍是具有挑战性的研究课题（Raudsepp-Hearne et al., 2010）。

（二）国内研究现状和水平

1997 年 Costanza 在 *Nature* 的文章发表以来，同国外一样，中国有关生态系统服务的科学研究总体上增多，成为相关研究领域的持续热点之一（图 1-1）。同样，在 2013 年前 4 个多月检索到的 402 篇英文文献（检索条件与上文相同）中，以文章作者的国籍作为统计依据，中国作者的文章为 32 篇，仅次于美国（151 篇）、英国（49 篇）、德国（35 篇）、澳大利亚（33 篇），位居世界第 5。早期国内生态系统服务研究除了对生态系统服务的含