

生态系统服务权衡与协同研究进展 及地理学研究议题

李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马 程, 王 珏

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 由于生态系统服务的多样性、空间分布的不均衡性以及人类使用的选择性, 在人为活动和自然因素作用下, 服务之间的关系出现了此消彼长的权衡、相互增益的协同等变化。理解服务权衡与协同的表现类型、形成机理、尺度依存和区域差异, 对于制定区域发展与生态保护“双赢”的政策措施具有重要意义。从相互作用与联系、类型与形成机制、研究方法 with 工具、尺度效应以及不确定性等方面评述了生态系统服务权衡与协同的国内外研究进展和局限性, 并对研究趋势进行了展望。在此基础上, 提出从地理学视角研究生态系统服务权衡与协同的主要议题, 包括服务供需的时空异质性、权衡与协同的形成机制、尺度依存和区域差异等。可为拓展生态系统服务权衡与协同研究的深度和广度, 提升地理学综合研究水平提供借鉴与参考。

关键词: 生态系统服务; 权衡; 协同; 研究进展与趋势; 地理学议题

1 引言

1.1 权衡与协同的定义

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^[1], 为人类直接或间接从生态系统得到的所有收益^[2]。由于生态系统服务种类的多样性、空间分布的不均衡性以及人类使用的选择性, 生态系统服务之间的关系出现了动态变化, 表现为此消彼长的权衡、相互增益的协同等形式。所谓权衡 (tradeoffs) 是指某些类型生态系统服务的供给, 由于其它类型生态系统服务使用的增加而减少的状况^[3]。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。

一些地区的研究案例表明, 生物多样性与多种生态系统服务之间存在着协同关系, 增强对生物多样性的保护会导致供给服务的增加^[4,5]。研究表明, 几乎所有已知的生态系统服务尤其是供给服务, 人类的利用程度都在增加^[6]。可以认为, 过去几十年人类平均寿命提高和贫困减缓是人类提高食物供给 (农作物、畜牧和鱼类养殖) 能力的结果^[7]。由于对服务需求的增加, 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。例如, 在山地农业区开垦坡地种植农作物, 粮食产量的提高常常会以土壤侵蚀的加剧为代价。按照目前趋势发展下去, 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年来大

收稿日期: 2012-10-10; 修订日期: 2013-04-05

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (41130534)

作者简介: 李双成(1961-), 男, 河北人, 博士, 教授, 主要从事生态系统服务与区域社会福祉耦合机制研究。

E-mail: sclli@urban.pku.edu.cn

多数其它类型服务都呈现下降趋势,调节服务的下降速率极其显著。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^[7,8]。

1.2 权衡与协同研究的重要性

1.2.1 科学意义 目前,生态系统服务研究已成为国内外生态学和相关学科研究的前沿领域,并取得了较多的研究成果^[9,10]。然而,一些与社会实践相关的科学难题急需得到解决。

首先,在自然资源限制日益突出的情形下,一种生态系统服务或人类活动的增加常常会导致其他服务和活动的减少^[11]。过去一个世纪中,供给服务的增加已经付出了调节和文化服务及生物多样性降低的代价^[3,7,12]。必须同时考虑多种生态系统服务和多种生产功能,而不仅仅追逐一种服务的收益,因为任何一种生态系统服务都或正或负地与其它服务相关^[12]。要兼顾多种生态系统服务,使其效益最大化,生态系统服务之间相互作用关系如何?有几种外在表现形式?是权衡、协同抑或是无关?这些都是需要回答的问题。

其次,现在的科学认知水平虽然能够较好地理解森林砍伐与土壤侵蚀、水质下降以及降低洪水控制之间的因果关系,但不能从数量上测定森林砍伐对这些生态系统服务的影响^[13],同时也不能精确地认识到资源被开发到何种程度而不使生态系统的功能与服务发生不可逆变化。在外界条件的扰动下,生态系统服务非线性特征如何,其变化是否存在阈值效应?这个问题仍然没有解决。

第三,生态系统服务研究与应用的另一个挑战是:在受到外界因素作用后,不同的生态系统服务响应的时间和空间尺度不同。权衡可发生在不同的生态系统服务之间,也可发生于服务现在和未来的提供之间。例如,在密西西比河谷由于大量施用化肥带来的生产力增加产生了快速的经济收益,然而在农业增产后的20年,墨西哥湾才出现了死亡地带^[11]。生态系统服务之间权衡与协同关系存在什么样的时空尺度效应?在管理实践中,怎样才能避免尺度不匹配造成的管理效能低下和管理措施的缺失?

因此,在分析生态系统服务之间多重非线性关系的基础上,辨识不同尺度下权衡与协同形成的驱动因素、类型特征、响应速率及时空格局,对于深化生态系统服务研究具有重要意义。

1.2.2 学科发展意义 一方面,研究生态系统服务权衡与协同,可以拓展地理学过程研究的深度和广度,提供地理学综合研究的核心议题。首先,在生态系统结构—功能—服务级联关系研究中,涉及自然过程、自然—人文过程和人文过程递进关系。不论是自然地理学还是人文地理学都可以找到适合其学科特点的研究议题^[14],从而推进地理学的过程研究。其次,对生态系统服务权衡与协同命题进行研究,涉及到自然和人文两个系统的耦合分析。因为,权衡与协同的产生是人类通过土地利用等方式对自然生态系统服务有选择使用的结果,是人类社会系统对自然生态系统施加影响的产物。第三,需要从不同时空尺度进行解释才能理解生态系统服务权衡与协同的形成机制。同样的一个政策或措施,如REDD(发展中国家通过减少砍伐森林和减缓森林退化而降低温室气体排放的计划)在农户、局地、区域和全球上的权衡与协同效应是不同的。由此可见,对生态系统服务权衡或协同进行研究,将会成为地理综合研究的核心议题之一。

另一方面,由于引入地理学的理论、方法和技术,使得生态系统服务权衡与协同研究在时空格局分析与表达、空间流动模拟、尺度效应检视、区域差异分析以及形成过程中自然与人文因素的作用机理等方面有了巨大进步,这将有利于建构多学科参与的综合性生

态系统服务科学体系。

1.2.3 实践意义 从宏观决策层面来说, 中国长达30余年的经济快速发展, 对自然环境造成了巨大负面影响, 表现为环境污染加剧、自然生态系统面积比例降低、物种减少及生境破碎、生态灾难频发等。因而, 中共“十八大”报告提出“把生态文明建设放在突出地位”, “努力建设美丽中国, 实现中华民族永续发展”。生态文明建设和经济建设、政治建设、文化建设、社会建设“五位一体”, 要求在发展的同时加强生态保护, 必须在发展与保护之间找到平衡点, 这客观上要求强化生态系统生产功能与环境调节、支持功能的权衡分析, 以期为各个层次的区域发展与生态建设提供决策依据。

从具体应用层面来说, 首先, 生态系统服务的权衡与协同分析, 可以为区域国土规划、生物多样性保护和生态补偿等提供科学依据。例如, 农业生产中包括了在生态系统服务之间的几种非常重要的权衡。砍伐森林用于农业生产会增加食物的供应, 但可能导致生物多样性减少、森林净化水源和调节气候作用的下降。设定发展优先、保护优先以及两者兼顾等一系列土地利用情景, 通过权衡与协同分析, 厘定多种生态系统服务的数量消长及空间分布变化, 然后与区域发展目标相联系, 可以选择最优的土地利用规划方案, 并提出相应的管控措施。其次, 生态系统服务在当前和未来利用之间也存在权衡。例如, 当前的过度放牧会使牧场未来载畜能力及适应极端气候事件的能力下降。通过时间上的权衡分析, 找到现实的资源利用强度, 才能维持生态系统供给服务的流, 降低环境和社会对突发事件的脆弱性。在现实和未来的生态系统服务利用上找到平衡点, 有利于区域社会经济的可持续发展。第三, 在管理实践中, 通常倾向于低估调节服务和产生这些服务的生态系统过程。另外, 由于形成调节服务的生态系统组分变化缓慢, 往往被政策制定者所忽视, 从而对生态系统供给服务的长期供应能力造成潜在的严重影响。

2 国内外主要研究进展

2.1 国际研究现状和最新进展

近年来, 权衡与协同分析已成为国际上生态系统服务研究领域的热点之一(图1)。总结和回顾国际上在这一议题近年的研究工作, 取得主要成果和进展如下:

2.1.1 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。生态系统对人类社会福祉提供多重的服务, 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^[15,16]。加强对生态系统功

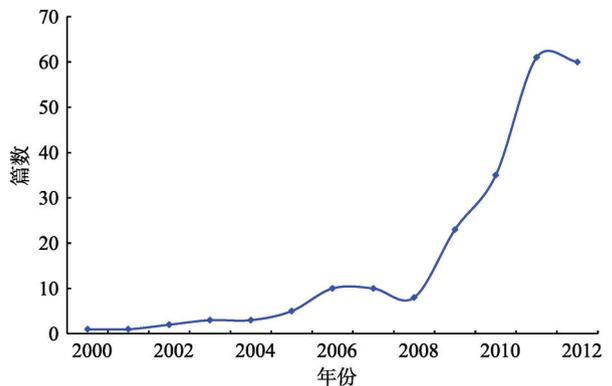


图1 国外生态系统权衡研究发展趋势

Fig. 1 The international research trend in tradeoffs among the ecosystem services

注: 以“ecosystem services”和“tradeoffs”或“trade-offs”在ISI web of Knowledge上检索, 时间段为2000-2012年。

能非线性的理解和定量化水平的提升,将能提供更实际的生态系统服务价值评估,改善基于生态系统的管理实践^[17]。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^[8,18-22]。然而,对于生态系统过程和服务之间关系的理解仍然相当模糊。因此,尚不清楚取舍的时间和数量以及它们之间的协同作用,同样在对引起这些问题的机制、如何将取舍的成本最小化以及如何加强协同效应等方面也缺乏认识^[8]。

在研究方法方面,Bennett等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型体系,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^[12]。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^[23]。目前,研究生态系统服务多重关系的关联与整体特征时常采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^[24]。

2.1.2 权衡与协同类型与形成机制 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。

权衡常常发生在小区域与大区域、短期与长期以及可逆性服务与不可逆性服务之间,因而可以从空间、时间和可逆性三个方面去理解与分析生态系统服务之间的权衡^[3]。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^[25]。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。

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”型权衡等^[26]。

生态系统服务簇及其权衡也会受到社会经济和文化因素的影响。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。其结果表明,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。通过冗余分析和层次聚类分析,确定了社会偏好导致的生态系统服务权衡和服务簇,清晰地发现了在供给服务和调节服务以及文化服务之间的权衡^[27]。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。激励政策与土地利用、土地利用与生态系统服务之间的关系是非线性的,并且具有时空异质性特征。这些关系具有一对多、多对一和多对多三种模式^[28]。

2.1.3 权衡与协同研究方法 在自然科学领域,目前常用的生态系统服务权衡与协同研究方法主要有:图形比较、情景分析以及模型模拟等^[29]。

图形比较是通过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^[30]。Egoh等使用图形表征了南非5个生态系统服务的供应(地表水供给, 水流量调节, 土壤堆积物, 土壤保持力和碳贮存), 并进而评估它们之间的关系^[31]。Raudsepp-Hearne等对12种生态系统服务进行空间制图和聚类分析, 确定了6类生态系统服务簇, 最终识别出不同服务之间的协同与权衡类型和区域^[24]。Onaindia等利用GIS技术对西班牙北部Urdaibai生物圈保护区的生物多样性、碳贮存以及径流调节3种生态系统服务进行空间制图, 通过分析其空间分布的一致性, 确定了3种服务的权衡与协同关系^[32]。

情景分析是目前权衡与协同研究最为常见的一种方法, 通过制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。2000-2050年间, 农业用地扩张将是现有草地、林地及其相应的基因资源、林木生产、栖息地等相关生态系统服务减少10%-20%的主要原因^[33]。Bulter等利用4种土地利用情景评估了澳大利亚大堡礁地区水质调节服务与其他10种服务(包括利益相关者)之间的权衡与协同关系。结果表明, 最直接的竞争关系发生在食物和纤维生产与水质调节之间, 而水质调节与渔业生产之间则呈现相互协同的促进作用^[34]。

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, 最后通过多目标优化等方法, 提出满足目标要求的规划方案。例如, Nickerson等应用种群动态模型模拟了菲律宾红树林生境的鱼类数量变化, 并制定了未开发、混养业和半集约的虾养殖业3种情景, 权衡分析了3种情景在保护与开发中的利弊^[35]。Bekele等融合SWAT模型与多目标进化算法模拟了美国伊利诺伊州农业商品生产和非点源污染控制方面的生态系统服务, 并提供了基于权衡分析的解决方案^[36]。Valdivia等将权衡分析与市场均衡模型进行耦合, 以肯尼亚Machakos地区为例, 分析了半自给农场尺度在增施肥料、乡村发展以及两者结合3个情景下乡村贫困与土壤养分消耗之间的权衡^[37]。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种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^[38]。Haines-Young等使用一个专家和文献驱动模型, 分析了欧洲作物生产、野生动物产品、生境多样性以及休闲娱乐4种生态系统服务在1990-2000年、2000-2006年和2000-2030年(情景)时段土地利用变化对于生态系统服务供给能力的边际变化^[39]。

2.1.4 权衡与协同分析工具 目前对权衡与协同进行的分析工具较多^[40], 但具有空间分析功能且应用广泛的当属基于GIS平台的InVEST软件(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, Natural Capital Project, 2011)^[41]。Nelson等应用InVEST模型模拟了美国俄勒冈州威拉米特盆地3种可能的土地利用/土地覆被变化情景(规划、发展和保护情景)如何影响涵养水源服务(水质改善与洪峰消减)、土壤保持、碳贮存、生物多样性保护以及一些所提供商品(农产品生产、木材收获以及乡村住宅建造)的价值; 研究表明, 在保护情景之下, 碳贮存、水质和土壤保持得分显著增加。水质与潜在土壤保持在规划情景与发展情景下仅有微小变化, 但是在保护情境下有所提高。洪峰消减得分在全部3

种情景下略微下降,但是在保护情景下下降最小^[41]。Goldstein等利用InVEST软件,评估了夏威夷O'ahu岛屿7种规划用地情景下,包括碳贮存和水质改善在内的生态系统服务供给与不同土地利用方式能够产生的经济回报。使用每种生态系统服务与经济回报相对于现状变化的百分比,来表征权衡。通过权衡分析,决策者接受的规划方案带来了正向的经济回报(109万美元)以及碳贮存服务的增加(相对于现状增加0.5%),然而水质改善服务却因此减少(潜在氮排放增加15.4%)^[42]。

2.1.5 权衡与协同的尺度效应 从供给方来说,生态系统服务的尺度依存特性来自于生态系统功能的尺度效应^[43]。一些生态系统服务只在局地尺度发挥作用,而另外一些服务空间范围则很宏大。前者如土壤形成等,后者如气体调节等;一些生态系统服务持续的时间较短,而另外一些服务能够长期存在。前者如汛期洪水减缓等,后者如水源涵养等。从需求方来说,生态系统服务的尺度依存特性由不同层次消费者在不同阶段对于服务需求的差异而致。不同时空尺度的生态系统服务供给与消费相互作用是权衡与协同具有尺度依存特性的主要原因。从空间尺度来说,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^[44],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^[3]。

在研究中已发现权衡关系具有区域异质性。REDD计划试图达到增加碳汇和生物多样性保护的“双赢”结果,但如果地理区域选择不当,同样会出现权衡结果^[45]。对阿根廷50年的土地利用变化所引起的生态系统供给服务和经济收益进行权衡分析表明,不同的区域两者的权衡关系是不同的。在土地利用政策制定时应充分考虑区域差异,并在生态系统服务功能和经济发展之间找到平衡点^[46]。实际案例分析也证实了时间权衡的存在。如McNally等以坦桑尼亚Saadani国家公园为案例区,融合遥感数据和矢量化的家庭调查数据,分析了砍伐红树林作为薪柴和收获鱼虾两种生计活动短期与长期得失。研究发现,禁止砍伐红树林作为薪柴,家庭会遭受短暂损失尤以较为富裕家庭最为明显,但可以从保护红树林而增加的鱼虾收获中获得更大的长期收益。定量结果是红树林覆盖度增加10%,可使鱼虾收入增加2倍^[5]。

2.1.6 权衡与协同分析的不确定性 一般认为,权衡与协同分析的不确定性来自于生态系统服务币值化过程或模型模拟物理量过程。Johnson等评述了生态系统服务价值评估的不确定性,指出正是由于价值核算不确定性以及农业收益波动性的存在,在土地利用的权衡分析中应当采用谨慎的做法^[47]。Hou等对景观分析和生态系统服务评价的不确定性的来源进行了分析,指出景观与自然系统的复杂性、方法的不确定性以及被调查对象的社会偏好是产生不确定性的主要原因。加大样本数量、使用标准化的评估方法以及提高数据质量是减少评估过程中不确定性的重要途径^[48]。

2.2 国内研究现状和水平

2.2.1 理论探索 近年来,国内学者对于生态系统服务之间的非线性关系,权衡与协同的类型与研究方法等方面进行了总结和探讨。在对生态系统服务生产、输送和消费过程中关键问题分析的基础上,总结得出:①在生态系统服务生产过程中,生态系统服务与生态系统功能之间并不一一对应,而且生态系统服务之间在生产过程中存在着相互作用。协同增效和相互抑制是生态系统服务之间两个非常普遍的相互作用;②生态系统服务效用的

空间分布特征决定了它们是否能够被输送, 根据输送载体的不同, 输送方式主要有自然输送和人为输送两种; ③ 在生态系统服务消费的同时需要获得一定数量的资金投入来保证生态系统服务的再生产^[49]。李鹏等以生态系统服务竞争与协同为视角, 厘清了生态系统服务竞争与协同的基本内涵, 总结了生态系统服务竞争与协同的主要类型, 探讨了生态系统服务竞争与协同的空间与时间尺度效应; 介绍并总结了生态系统服务竞争与协同两种主要研究方法(生态—经济综合模型方法和基于土地利用的情景分析法)的特点与适应范围^[50]。肖玉等在对功能多样性—生态系统功能关系以及基于功能性状的生态系统服务研究基础上, 总结归纳了基于功能性状的生态系统服务研究框架。在该框架中, 首先选取对生态系统功能影响显著的非生物因子和功能多样性指数, 然后量化非生物因子和功能多样性—生态系统功能和生态系统功能—生态系统服务之间的关系, 进而构建功能多样性与生态系统服务的关系^[51]。闵勇等在分析了当前研究中的问题和难点后, 提出了一种新的交叉学科研究路线, 即利用来自基因调控研究的布尔网络模型为生态系统服务间的复杂互动提供建模和模拟分析平台, 以食物生产系统的4项基本生态服务的关系为案例, 设定一个基本情景和一个调控情景, 分析4项生态系统服务的相互关系变化对系统功能的影响; 结果表明, 运用布尔网络模型可以在简单规则和少量数据的条件下, 模拟多个生态服务之间非线性的复杂相互作用, 并能为研究调控多种生态服务提供建议^[52]。

2.2.2 应用案例 近年来, 国内在生态系统服务权衡与协同方面的研究逐渐兴起。葛菁等在二滩水库集水区, 按照当地生态政策发展以坡度为指标构建了10种未来土地覆被格局情景, 研究生态系统减轻水库泥沙淤积、减轻水库面源污染、产水发电的服务及价值对未来覆被格局的响应程度, 并兼顾相关产业收益的变化, 权衡各种情景格局的服务效益, 优选利益相关方福祉提升幅度最大的情景格局^[53]。林泉以浑善达克正蓝旗地区为例, 找出畜产品供给服务功能和防风固沙功能之间相互关联作用的因子, 分别对这两种功能进行价值化处理, 得到价值分析的最优组合, 构建了这两种服务之间定量的权衡模式。结果表明, 适当的放牧对草地的防风固沙功能具有促进作用; 典型草原复合草原、湿地草甸和低山丘陵湿地草原能够承担较大的载畜量, 同时具有良好的防风固沙功能; 低山丘陵典型草原和沙丘间典型平原草原防风固沙的价值明显大于畜产品供给价值, 应当有节制有选择的开发利用^[54]。Chen等以中国2000年土地利用数据为基准, 利用CLUE模型分别评估了“一切照常情景”、“规划情景”和“优化情景”3种情景下森林、草地和湿地生态系统服务变化^[55]。Bai等应用InVEST模型分析了河北白洋淀地区在无农用地转换、无城市扩张、农业发展、林业发展以及河岸造林五种情景下农业生产、水电生产和水质维持三种生态系统服务的权衡关系, 并找出兼顾生态与经济可持续发展的土地利用方案^[56]。Su等以黄土高原延河流域为案例区, 以乡为单位构建了人类活动指数(HAI), 并分析了这一指数与初级生产力、碳汇、产氧量、水土保持等生态系统服务之间的关系^[57]。

3 研究局限与发展趋势

3.1 研究局限

总结近几年国内外生态系统服务权衡与协同研究工作, 可以发现一些仍需加以改进和提高的方面:

(1) 生态系统服务之间相互联系与相互作用的机理尚不清楚, 对其非线性动力学特征

研究不够。前已述及,生态系统给人类提供的服务类型多种多样,服务之间的关系是非线性的,存在着突变、阈值、补偿或替代等复杂性特征。目前尚缺乏对生态系统服务之间非线性特征研究技术和方法,已有的研究工作仅仅是通过相关或聚类分析对多重生态系统服务关系进行“线性化”处理或空间叠加识别。

(2) 生态系统服务权衡与协同的形成过程尚不明晰。生态系统结构与功能以及向人类提供的服务具有动态可变性。生态系统服务之间关系的调整是响应外力作用的结果。没有人类的干预,生态系统服务之间也存在着竞合关系。权衡既是人类选择利用生态系统服务的决策过程,也是服务关系响应选择性利用而出现的外在表征。目前对于权衡与协同的研究多是基于统计关系的数量分析,缺乏形成机理的解释与表达,尤其缺乏对不同时空尺度下行主体对生态系统服务动态变化的影响分析。因而,制定出的生态系统管理政策措施针对性不强。

(3) 没有重视生态系统服务权衡与协同的尺度效应。生态系统服务的供需双方均存在着尺度效应,因而权衡和协同关系也必然是尺度依存的,且有区域差异。目前国内外对于生态系统服务权衡与协同的研究案例多是单一尺度的,且区域不同、时空尺度不同、以及分析涉及的生态系统服务的类型也不尽相同,研究结果难以比较。

3.2 研究发展趋势

综合已有研究成果并结合作者的认识,提出以下生态系统服务权衡与协同研究的发展趋势:

(1) 强化生态系统服务之间相互作用非线性关系特征研究。利用非线性动力学等科学理论和方法,系统分析不同服务之间的耦合机制,研究生态系统服务响应外界扰动的快慢变化及其阈值等。

(2) 重视研究生态系统服务权衡与协同关系的时空异质性。在空间上,识别生态系统服务的供给单元、需求单元及其空间流动的路径和速率;在时间上,分析生态系统服务供给能力和人类选择偏好的动态特征。

(3) 揭示在不同的政策和激励措施下,不同时空尺度需求主体通过土地利用和生产生活方式作为传导途径,引起的区域间权衡与协同关系的动态变化特征。

(4) 完善生态系统服务权衡与协同分析的研究方法。目前已有的图形比较、情景分析以及模型模拟三种研究方法中,模型模拟方法亟需得到加强和发展。未来的发展方向是在现有相关分析的基础上,进一步发展能够定量表达服务间动态关系且能反映尺度依存特性和区域差异的模型途径。

总之,生态系统服务的权衡与协同研究向着更加重视揭示形成机制、识别尺度效应、明晰区域差异的方向发展。

4 地理学视角的权衡与协同研究议题

4.1 地理学研究权衡与协同的逻辑前提

从生态系统功能到生态系统服务都存在着时空异质性,不同利益相关方对服务的需求与选择也有群体和层次差异。因而,在外力(自然力或人为影响)刺激下,生态系统服务的权衡与协同具有尺度和区域依存特性。换句话说,生态系统服务供给与消费双方相互作用及耦合关系在不同时空尺度上有不同的表现形式,呈现出显著的空间异质性和区域分异

性, 由此衍生出的政策措施也是有一定适用地域和时间范围的。本质上, 对于权衡与协同尺度依存和区域分异特征的解构与整合是属于地理学科研究范畴的。

4.2 主要研究议题

4.2.1 生态系统服务供给与需求时空异质性

(1) 从空间分析角度而言, 主要研究3个方面的内容: ① 明晰生态系统服务的空间范围及空间传输特征。从供给角度来说, 不同的生态系统服务具有不同的空间尺度和传输特征, 对其使用构成直接影响。通过专家知识、模型模拟和GIS空间分析等手段明晰每一类生态系统服务的空间范围和传输特征, 用以比较不同生态系统服务的空间一致性, 以判断空间权衡或协同及其发生区域; ② 识别不同行政尺度利益相关方生态系统服务需求。通过调查访谈等形式获取不同利益相关方对于生态系统服务的感知和选择偏好。分析不同年龄、职业、收入、教育背景等特征对生态系统服务需求的影响。研究内容包括与生态系统服务相关政策的效能、不同类型区域生态系统服务重要性和使用优先度排序、影响生态系统服务价值形成的社会经济和文化因素等; ③ 生态系统服务的供给区和受益区及连接路径。根据每种生态系统服务的类型、空间分布范围和流动性特征以及整个区域消费者区域分异特征, 确定主要生态系统服务的供给区、受益区及连接路径, 并对其空间制图, 为明晰权衡与协同的区域差异奠定基础。

(2) 从时间变化分析角度而言, 主要研究两个方面的内容: ① 预测各种生态系统服务供给量的时间变化趋势。通过模型模拟等手段, 分析在自然因素和人类活动影响下每一种生态系统服务供给量的动态特征; ② 分析不同利益相关方需求的变化态势。通过对一定区域内社会经济发展态势以及不同利益相关方对服务需求偏好的时间变异特征分析, 从需求角度解释权衡和协同形成的诱导因素。

4.2.2 生态系统服务权衡与协同的形成机制 在对生态系统服务供给与需求时空异质性研究的基础上, 分析在外力(自然因素与人为作用)作用下生态系统服务权衡(竞争)与协同的形成机制。研究内容包括揭示从外力作用到权衡与协同产生过程的传导路径; 分析各类生态系统服务响应外力作用如气候变化或土地利用类型转换而引起变化的快慢, 应用自组织和协同理论, 辨识快变量和慢变量及其役使关系; 揭示生态系统服务动态关系调整而出现的外在表现形式及其时空特征。

4.2.3 生态系统服务权衡与协同尺度依存和区域分异特征 通过对不同尺度上生态系统服务与权衡类型、强弱和表现形式的比较分析, 研究其尺度依存特征。在空间尺度上, 主要回答: 在小尺度上某种权衡(如农业灌溉和径流量水质净化)或协同关系(如土壤保持和水质净化)在中尺度乃至大尺度上有怎样的变化? 包括关系性质(权衡或协同抑或无关)是否改变, 联系程度是否增强或变弱? 在时间尺度上, 主要研究在自然因素如气候变化和人为因素如补贴或贴现等财政与金融政策作用下, 上述这些关系的时间变化趋势。在对生态系统服务域内和域外效应及空间流动特征分析的基础上, 利用GIS空间分析模型揭示权衡和协同的区域分异特征, 并从供需两个方面解释其成因。

4.2.4 政策或激励措施效能的时空特征 在对生态系统服务权衡与协同形成机制、尺度依存和区域差异研究的基础上, 评估不同区域发展或生态保护政策效能的时空特征及区域差异, 辨识引起服务权衡与协同的关键环节和驱动力, 厘清各个区域所承担的社会、经济和生态主体功能, 并制定出兼顾三者功能的区域发展战略。

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 et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [3] Rodríguez J P, Beard Jr T D, Bennett E M et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28.
- [4] Nelson E, Mendoza G, Regetz J et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7: 4-11.
- [5] McNally C G, Uchida E, Gold A J. The effect of a protected area on the tradeoffs between short-run and long-run benefits from mangrove ecosystems. *PNAS*, 2011, 108: 13945-13950.
- [6] Pergams O R W, Zaradic P A. Evidence for a fundamental and pervasive shift away from nature-based recreation. *PNAS*, 2008, 105: 2295-2300.
- [7] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [8] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J et al. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *PNAS*, 2009, 106: 1305-1312.
- [9] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 等. 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, 4(6):571-576.
- [10] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 1-10.
- [11] Tallis H M, Kareiva P, Marvier M et al. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *PNAS*, 2008, 105: 9457-9464.
- [12] Bennett E M, Balvanera P. The future of production systems in a globalized world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5: 191-198.
- [13] Tallis H M, Kareiva P. Shaping global environmental decisions using socio-ecological models. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21: 562-568.
- [14] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. *地理学报*, 2011, 66(12): 1618-1630.
- [15] Farber S C, Costanza R, Wilson M A. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological Economics*, 2002, 41: 375-392.
- [16] Van Jaarsveld A S, Biggs R, Scholes R J et al. Measuring conditions and trends in ecosystem services at multiple scales: The Southern African Millennium Ecosystem Assessment (SAfMA) experience. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 360(1454): 425-441.
- [17] Barbier E B, Koch E W, Silliman B R et al. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. *Science*, 2008, 319(5861): 321-323.
- [18] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *PNAS*, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [19] Kremen C, Ostfeld R S. A call to ecologists: Measuring, analyzing, and managing ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(10): 540-548.
- [20] Tallis H, Kareiva P. Ecosystem services. *Current biology*, 2005, 15(18): R746-R748.
- [21] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12: 1-11.
- [22] Carpenter S R, DeFries R, Dietz T et al. Millennium ecosystem assessment: research needs. *Science*, 2006, 314: 257-258.
- [23] De Bello F, Lavorel S, Díaz S et al. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19: 2873-2893.
- [24] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *PNAS*, 2010, 107: 5242-5247.
- [25] Tilman D, Cassman K G, Matson P A et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002, 418: 671-677.
- [26] Lester S E, Costello C, Halpern B S et al. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial

- planning. *Marine Policy*, 2013, 38: 80-89.
- [27] Martín-López B, Iniesta-Arandia I, García-Llorente M et al. Uncovering ecosystem service bundles through social preferences. *PLoS ONE*, 2012, 7(6): e38970. doi:10.1371/journal.pone.0038970.
- [28] Bryan B A. Incentives, land use, and ecosystem services: Synthesizing complex linkages. *Environmental Science & Policy*, 2013, 27: 124-134.
- [29] Lautenbach L, Volk M, Gruber B et al. Quantifying ecosystem service trade-offs. In: Seppelt R et al. *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting*. Ottawa, Canada, 2010.
- [30] Chan K M A, Shaw M R, Cameron D R et al. Conservation planning for ecosystem services. *PLoS Biology*, 2006, 4: 2138-2152.
- [31] Ego B, Reyers B, Rouget M et al. Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in South Africa. *Biological Conservation*, 2009, 142: 553-562.
- [32] Onaindia M, Fernández de Manuel B, Madariaga I et al. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation. *Forest Ecology and Management*, 2013, 289: 1-9.
- [33] Alcamo J, van Vuuren D, Ringler C et al. Changes in nature's balance sheet: model-based estimates of future worldwide ecosystem services. *Ecology and Society*, 2005, 10(2): 19.
- [34] Butler J R, Wongb 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, doi:10.1016/j.agee.2011.08.017.
- [35] Nickerson D J. Trade-offs of mangrove area development in the Philippines. *Ecological Economics*, 1999, 28: 279-298.
- [36] Bekele E G, Nicklow J W. Multi objective management of ecosystem services by integrative watershed modeling and evolutionary algorithms. *Water Resources Research*, 2005, 41(10): W10406.
- [37] Valdivia R O, Antle J M, Stoorvogel J J. Coupling the Tradeoff Analysis Model with a market equilibrium model to analyze economic and environmental outcomes of agricultural production systems. *Agricultural Systems*, 2012, 110: 17-29.
- [38] White C, Halpern B S, Kappel C V. Ecosystem service tradeoff analysis reveals the value of marine spatial planning for multiple ocean uses. *PNAS*, 2012, 109: 4696-4701.
- [39] Haines-Young R, Potschin M, Kienast F. Indicators of ecosystem service potential at European scales: Mapping marginal changes and trade-offs. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 39-53.
- [40] Nemeč K T, Raudsepp-Hearne C. The use of geographic information systems to map and assess ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 2013, 22: 1-15.
- [41] Natural Capital Project. InVEST: Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs. <http://www.naturalcapitalproject.org/InVEST.html>, 2011-10-02.
- [42] Goldstein J H, Caldaroni G, Duarte TK et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *PNAS*, 2012, 109: 7565-7570.
- [43] Zhang Y J, Holzzapfel C, Yuan X Y. Scale-dependent ecosystem service. In: Wratten S et al. *Ecosystem Services in Agricultural and Urban Landscapes*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2013. 107-120.
- [44] Bohensky E L, Reyers B, van Jaarsveld A S. Future ecosystem services in a Southern African river basin: A scenario planning approach to uncertainty. *Conservation Biology*, 2006, 20: 1051-1061.
- [45] Phelps J, Friess D A, Webb E L. Win-win REDD+ approaches belie carbon-biodiversity trade-offs. *Biological Conservation*, 2012, 154: 53-60.
- [46] Carreño L, Frank F C, Viglizzo E F. Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 154: 68-77.
- [47] Johnson K A, Polasky S, Nelson E et al. Uncertainty in ecosystem services valuation and implications for assessing land use tradeoffs: An agricultural case study in the Minnesota River Basin. *Ecological Economics*, 2012, 79: 71-79.
- [48] Hou Y, Burkhard B, Müller F. Uncertainties in landscape analysis and ecosystem service assessment. *Journal of Environmental Management*, 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.12.002.
- [49] 陈祥义, 白彦锋, 姜春前, 等. 生态系统服务生产及输送和消费过程中的关键问题. *世界林业研究*, 2011, 24(4):

19-23.

- [50] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等. 生态系统服务竞争与协同研究进展. 生态学报, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [51] 肖玉, 谢高地, 安凯, 等. 基于功能性状的生态系统服务研究框架. 植物生态学报, 2012, 36(4): 353-362.
- [52] 闵勇, 常杰, 葛滢, 等. 生态系统服务复杂关系研究的机遇、挑战与对策. 科学通报, 2012, 57(22): 2137-2142.
- [53] 葛菁, 吴楠, 高吉喜, 等. 不同土地覆被格局情景下多种生态系统服务的响应与权衡: 以雅砻江二滩水利枢纽为例. 生态学报, 2012, 32(9): 2629-2639.
- [54] 林泉. 草地生态系统服务权衡的方法研究: 以浑善达克正蓝旗地区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [55] Chen Y Y, Jessel B, Fu B J et al. Ecosystem Service and Management Strategy in China. Beijing: China Environmental Science Press, 2011. 33-37.
- [56] Bai Y, Zheng H, Ouyang Z Y et al. Modeling hydrological ecosystem services and tradeoffs: A case study in Baiyangdian watershed, China. Environmental Earth Sciences, 2012, DOI: 10.1007/s12665-012-2154-5.
- [57] Su C H, Fu B J, Wei Y P et al. Ecosystem management based on ecosystem services and human activities: A case study in the Yanhe watershed. Sustainability Science, 2012, 7: 17-32.

The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography

LI Shuangcheng, ZHANG Caiyu, LIU Jinlong, ZHU Wenbo, MA Cheng, WANG Jue

(College of Urban and Environmental Science, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Due to the diversity of ecosystem services, the heterogeneity of the spatial distribution and the selectivity of human use, the mutual relationships between ecosystem services show the dynamic variation under the influence of human activities and natural factors, which are characterized by different patterns such as reciprocal tradeoffs and mutual gain synergies. Understanding types, formation mechanism, scale dependence and regional differences of tradeoffs and synergies among the ecosystem services has great significance on formulating "win-win" policies and the implementation of measures for regional development and ecological protection. Therefore, the domestic and international research progress and limitation in interactions and nonlinear relationships, types, formation mechanism, scale effects, methods and tools, and uncertainty of ecosystem services were systematically reviewed in this paper. Furthermore, the research trend was identified, and the research issues on the tradeoffs and synergies of ecosystem services were put forward from a geographic perspective including spatial-temporal heterogeneity, formation mechanism, scale-dependence and regional differences. This paper will help to expand the research depth and breadth on tradeoffs and synergies of ecosystem services, and promote the level of geography comprehensive study.

Key words: ecosystem services; tradeoff; synergy; research progress and trend; research themes of geography