

DOI: 10.5846/stxb201709251734

梁友嘉, 刘丽珺. 生态系统服务与景观格局集成研究综述. 生态学报, 2018, 38(20): - .

Liang Y J, Liu L J. Integration of ecosystem services and landscape pattern: A review. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

生态系统服务与景观格局集成研究综述

梁友嘉^{1,*}, 刘丽珺²

1 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070

2 武汉理工大学航运学院, 武汉 430000

摘要: 生态系统服务是综合科学和政策应用的有效工具, 可用于应对人类干扰下的景观和生态系统服务的快速退化等复杂生态环境问题。系统综述生态系统服务与景观格局集成的学科发展、基础理论和模型开发的进展与存在的问题, 建立可用的集成建模框架, 并提出知识集成的概念框架: 1) 在要素层, “政策-决策—景观—生态系统服务—社会经济系统”的跨学科知识反馈环是集成理论基础; 2) 在模型层, 结构化、多层次的集成模拟模型是核心方法; 3) 在数据层, 多源数据集成是模拟模型的数据基础。集成生态系统服务与景观格局为区域生态环境治理实践提供了科学参考, 能更好地应对生态系统服务科学与应用的挑战。
关键词: 生态系统服务; 景观格局; 集成建模; 决策支持

Integration of ecosystem services and landscape pattern: A review

LIANG Youjia^{1,*}, LIU Lijun²

1 School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

2 School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China

Abstract: Ecosystem services can be used as an effective tool for integrating science and policy research and to address complex ecological problems (such as rapid degradation of different landscape types and ecosystem services) as a result of human disturbances. This study summarizes an trend of recent studies in the field of ecosystem services models, including the basic disciplines, the fundamental theories, the types of integrated simulation models and related limitations, which showed that the integrated modeling framework were still obscure in the field of ecosystem services and landscape patterns. Based on this review from the perspective of systems science, a conceptual framework was proposed for this field. The framework was described by three synergetic dimensions, including an interactive layer of different system elements, a model layer, and a data layer. The main results are as follows: 1) the interdisciplinary knowledge feedback loop of “policy-decision process-landscape-ecosystem service-socioeconomic system” is the theoretical basis of the system elements layer in the field of integration theory; 2) the integrated simulation model is and will be the core tool in the model layer for methodology development; and 3) the integration of multi-source and long time-series data is a fundamental research to support the development and application of integrated model. The integration of ecosystem services and landscape patterns can provide scientific support for regional eco-environmental governance and also can be used to cope with the challenges of ecosystem service science and application in the future.

Key Words: ecosystem services; landscape pattern; integrated modeling; decision support

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601184, 41571514); 中央高校基本科研业务费专项资金(WUT: 2017IVB016)

收稿日期: 2017-09-25; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yjliang@whut.edu.cn

生态系统服务(Ecosystem Services, ESs)是人类从生态系统中获得的所有物质产品与服务,分为供给服务、调节服务、文化服务和维持前3种的支持服务^[1-2]。景观格局变化是指景观结构和功能及其随时间变化的过程与规律^[3-4]。伴随全球经济和人口规模的持续增长,高强度人类活动(如经济、技术和社会调控等)对不同时空尺度的景观格局产生了巨大改变,驱动着生态系统服务供给的显著变化^[5]。集成生态系统服务与景观格局已成为探讨生态系统时空分异规律以及与生态过程相关的区域资源和生态环境问题的重要途径。千年生态系统评估(the Millennium Ecosystem Assessment, MEA)指出,全球24项生态系统服务中有15项正在持续退化,严重威胁区域与全球生态安全。生态系统服务与景观格局集成是区域环境政策-决策制定和生态系统管理等跨学科领域的热点^[6]。随着生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)于2012年正式成立,各国政府和学术界对生态系统服务集成研究的关注度再次快速上升。

1 文献计量分析

生态系统服务与景观格局集成领域的发文量在快速增加。以Web of Science核心数据库和中国知网核心期刊数据库为例进行文献计量分析,分别检索(“land” OR “landscape”) AND (“ecosystem service”) AND (“integrated” OR “integrate” OR “integration”)和(“土地” OR “景观”) AND (“生态系统服务” OR “生态服务功能”) AND (“集成”),范围覆盖“题名”、“关键词”和“摘要”等类型。2000—2016年SCI论文为452篇,自2009年起持续走高,中文核心论文为84篇,发文量基本稳定,少于同期国际论文(图1)。SCI发文量前6位是:《Ecological Indicators》(57篇)、《Land Use Policy》(50篇)、《Ecosystem Services》(43篇)、《Science of The Total Environment》(38篇)、《Landscape and Urban Planning》(32篇)、《Ecological Economics》(30篇),其他期刊均低于30篇;中文核心论文主要发表在《生态学报》、《地理学报》、《应用生态学报》、《地理科学进展》、《生态学杂志》和《资源科学》等期刊,发文量相差明显;位列前6的论文关键词是:“土地利用变化”、“生态系统服务”、“景观生态”、“生态环境”、“生态系统”和“生态功能区划”等,表明集成研究关注生态环境评估与政策应用等核心主题;涉及的主要方法有遥感、地理信息系统、指标评估、生态过程模拟和景观格局分析等。本文系统综述已有重要理论与方法,并提出可用的生态系统服务集成建模和知识概念框架,旨在为区域生态系统服务与景观格局集成的理论探索与方法实践提供科学参考。

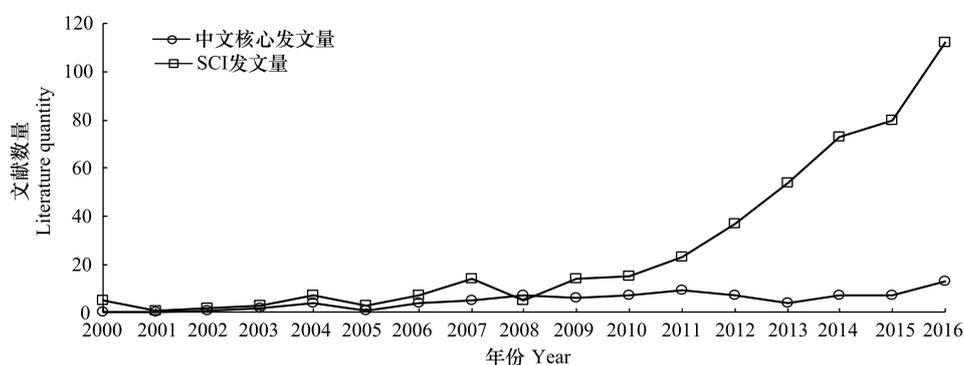


图1 生态系统服务与景观格局集成研究领域的文献数量变化

Fig.1 The number of related papers in the field of integration of ecosystem services and landscape pattern

2 景观格局对生态系统服务功能与过程的影响

生态系统服务功能与过程研究始于20世纪60年代^[7-9],至今已形成多种理论分类体系(表1)。例如,De Groot认为生态系统服务是生态过程和其组分满足人类所需产品和服务的能力^[10];Noël和O'Connor认为生态系统服务是生态系统支持经济活动或人类财富的特定功能或服务^[11],获得类似观点支持^[12-13];De Groot分

析了 24 种生态过程和服务功能^[14-15],但未严格给出景观格局、功能和过程的复杂对应关系;MEA 从全球尺度提出生态系统变化对人类福祉影响的生态系统服务评估框架;国内学者也形成多种研究成果^[16-21],国内外研究总体上有相似性,存在的问题是:1)概念重叠可能导致生态系统服务的重复测量和验证,如文献[10]中的“调节功能”包含[3]中的“调节和支持服务”;2)与景观格局相关的功能(如栖息地、信息和文化服务)多且零散,对应关系不清晰。受不同人类活动强度干扰的景观格局会产生相应生态过程,进而影响生态系统服务功能变化^[22]。例如,景观格局物理属性差异会导致地表反射率等系统属性变化,以此影响生态系统服务过程^[23]。当人类活动干扰程度较小时,供给服务较弱,调节和支持服务较强;适度干扰时,供给服务较强,调节与支持服务较弱;干扰强烈时,土地景观退化,多种生态系统服务的提供都受到威胁^[24-25]。

表 1 几种生态系统服务功能分类体系

Table 1 The function of ecosystem services in different classification systems

| 生命保障 Life supporting | 服务类型 Service types | | | | | 文献 Reference |
|---------------------------|--------------------|------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| | 生产 Production | 调节 Regulation | 栖息地 Habitat | 物质支持 Material supporting | 信息和文化 Information and culture | |
| 调节功能 Regulating function | 生产 | 调节 | 栖息地 | | 信息功能 | [10] |
| 生命保障 Life supporting | 源 | 汇 | | 生境 | 风景 | [11] |
| 再生过程 Regenerative process | 产品 | 稳态 | | | 生命,选择 | [12] |
| 生命保障 Life supporting | 源 | 汇 | | | 健康和福利 | [13] |
| 调节功能 Regulating function | 生产 | 调节 | 栖息地 | 承载功能 | 信息功能 | [14-15] |
| 支持服务 Supporting function | 供给 | 调节 | | | 文化服务 | [3] |

3 生态系统服务与景观格局集成方法

3.1 基于景观格局的生态系统服务评估

生态系统服务评估主要分为价值量评估和物质量评估^[26]。价值量评估利用价值理论突出自然资源的重要性,应用于区域生态补偿等领域^[27-28],通过不同景观类型的价值系数来估算生态系统服务的使用价值和非使用价值^[29-30]。但该方法难以反映景观格局的空间异质性以及经济评估的复杂性,如评估指标选取和赋值的主观性、特定景观价值的重复计算和缺乏生态学意义等^[31-36]。随着地理信息技术的发展,反映生态系统功能和过程的物质量评估正受到重视,出现与空间显式的景观格局模拟集成的趋势^[37-38]。

景观格局模拟模型常使用空间数据和非数值模拟方法(如自主体),揭示经济活动、生态系统管理(如农业管理和自然资源保护)与环境政策等导致的景观异质性,适用于空间显式的生态系统服务评估^[39-41]。例如,景观格局模拟模型通过需求或价格信息更新像元,已用于全球尺度农业生态系统服务评估^[42-44];环境政策导致的景观格局和生态系统服务的多尺度(景观-区域-全球)差异性也受到关注^[45-47]。集成景观格局模拟模型与生态系统服务评估的挑战有:1)甄别影响生态系统服务评估的景观过程和驱动力;2)提供高精度的景观数据;3)减少景观格局变化在经济和生态系统管理中的不确定性。

3.2 情景和权衡分析

情景分析方法能揭示未来景观格局和生态系统服务变化的可能性^[48],已成为生态环境政策与决策制定的重要方法^[49]。例如,通过情景制图表达生态系统服务与景观类型的对应关系^[50];利用利益相关者的偏好和情景方法获取不同服务价值的变化阈值^[51]。情景方法目前主要用于生态系统服务可能的变化趋势、决策结果及不确定性分析^[52-53]。

权衡分析是指对比空间、时间和可逆性等维度的生态系统服务变化,以发现潜在冲突和提出解决办法^[54]。其中,空间权衡分析区域间生态系统服务相互消长或协同;时间权衡分析当前生态系统服务利用对未来可能造成的影响;可逆性权衡分析可逆性恢复和不可逆性变化之间的长期平衡,均与服务类型、景观空间分

布异质性和人类活动方式有关^[55]。权衡方法主要有多目标线性规划和多准则分析^[56-57]。权衡分析无法揭示生态系统服务变化路径,综合使用情景和权衡方法会减少生态系统服务与景观格局集成的不确定性^[58]。

3.3 生态系统服务集成模拟模型开发

生态系统服务评估多基于静态平衡关系构建,缺少综合性的区域动态模拟能力。集成景观格局和决策的模拟模型已成为生态系统服务研究的主要工具。现有主流模型多具有空间显式、过程驱动和情景分析等功能,能模拟景观格局和环境政策变化对生态系统服务可能的影响(表 2)。存在的问题是:1)建模原理差异较大且缺乏知识共享;2)模型复杂性和数据可用性影响了模型的可推广性;3)多源数据集成和验证仍未有突破性进展。例如,WaterWorld 数据库中多种全球尺度的数据验证困难;4)决策信息收集与知识转换方法仍有待改进。

表 2 几种主要的生态系统服务集成模拟模型

Table 2 Integrated simulation models of ecosystem services

| 模型及可获取性 Model and accessibility | 模型概述 Description | 决策应用领域 Policy implication | 局限性 Limitations | 参考文献 Reference |
|---|---------------------------------------|---|-----------------------------|-------------------|
| Artificial Intelligence for Ecosystem Services(ARIES) | 基于 Web 人工智能和语义建模方法的贝叶斯网络模型;开源 | 生态补偿、生态规划等领域;有气候变化和景观变化情景模块 | 需要详细的专家知识和本地数据 | [59-60] |
| Co \$ ting Nature | 基于 Web 的在线建模工具;开源 | 景观决策领域,无情景模块 | 需要本地数据 | [61] |
| Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) | 基于 Python 和 GIS 的生态系统服务过程模拟和价值评估模型;开源 | 多尺度的水土资源管理等诸多领域;有景观变化的情景模块。 | 有缺省数据,需要本地数据、GIS/RS 技术和专家知识 | [62] |
| Multi-scale Integrated Models of Ecosystem Services(MIMES) | 系统动力学与 GIS 建模环境的生态系统服务过程模拟模型;开源 | 适用于生态、水文服务功能模拟;与决策过程和经济价值评估集成,有权衡分析功能 | 有缺省数据,需要本地数据、系统动力学模型和 GIS | [63] |
| Social Values for Ecosystem Services(SolVES) | 基于 VB.NET 和 GIS 的生态系统服务社会价值评估模型;开源 | 分析群体社会价值认知,集成区域决策;有景观变化情景模块 | 有缺省数据,需要本地调查数据和专家知识 | [64] |
| Ecosystem Portfolio Model (EPM) | 基于 Web 的生态系统服务经济价值评估模型;开源 | 与社区活动、土地价值及规划集成,有景观变化情景模块 | 有缺省数据,需要提供研究区数据 | [65] |
| InFOREST http://inforest.frec.vt.edu/ | 基于 Web 的生态系统服务功能模拟工具;开源 | 模拟空气质量、营养物和径流、固碳和多样性功能 | 有缺省数据,可添加本地数据,正在开发 | 无 |
| Toolkit for Ecosystem Service Site-based Assessment (TESSA) | 基于 GIS 的景观尺度生态系统服务模拟工具;提供动态分析和制图工具;开源 | 适用于生态系统服务政策与决策制定;可以集成到局地环境决策过程中 | 无缺省数据,需要详细的研究区数据 | [66] |
| Envision http://envision.bioe.orst.edu/ | GIS 支持的景观变化与生态系统服务集成模拟工具;开源 | 模拟水、碳、食物和木材、授粉和养分等;有情景分析功能 | 有缺省数据,目前仅可用于美国西北地区 | [67] |
| EcoMetrix http://ecometrixem.com/ | Parametrix 公司开发的小尺度生态系统服务功能模拟模型;付费 | 帮助政府部门设计和实施生态系统保护项目;可与大尺度评估模型集成;无情景分析功能 | 无缺省数据,需要野外调查数据 | 无 |
| EcoAIM https://www.exponent.com/ | Exponent 公司开发的生态系统服务功能模拟模型;付费 | 与环境决策集成;有权衡和情景分析功能 | 无缺省数据,需要受调查者的风险偏好数据 | 无 |
| WaterWorld | 基于过程的生态系统服务模拟模型;分布式数据驱动;开源 | 水土资源决策和政策制定;有景观与气候变化情景分析功能 | 缺省的气候水文、生物物理和生活经济数据 | [68] |
| Water Evaluation and Planning System(WEAP) | 基于过程的水文水资源模拟模型;开源 | 水资源决策分析,与决策过程集成;有情景分析功能 | 缺省数据,需要提供水文建模的核心数据 | [69] |

生态系统服务集成模拟模型呈现模块化、图形化、知识驱动和空间显式趋势^[70],集成多种跨学科知识和方法,据此提出生态系统服务与景观格局集成模拟框架(图 2),其方法特征有:1)注重使用多尺度、高分辨率

的空间数据;2)强调景观格局变化对生态系统过程的影响;3)关注生态系统服务的综合性与尺度效应;4)集成景观管理情景和权衡方法;5)开发不确定性分析方法。

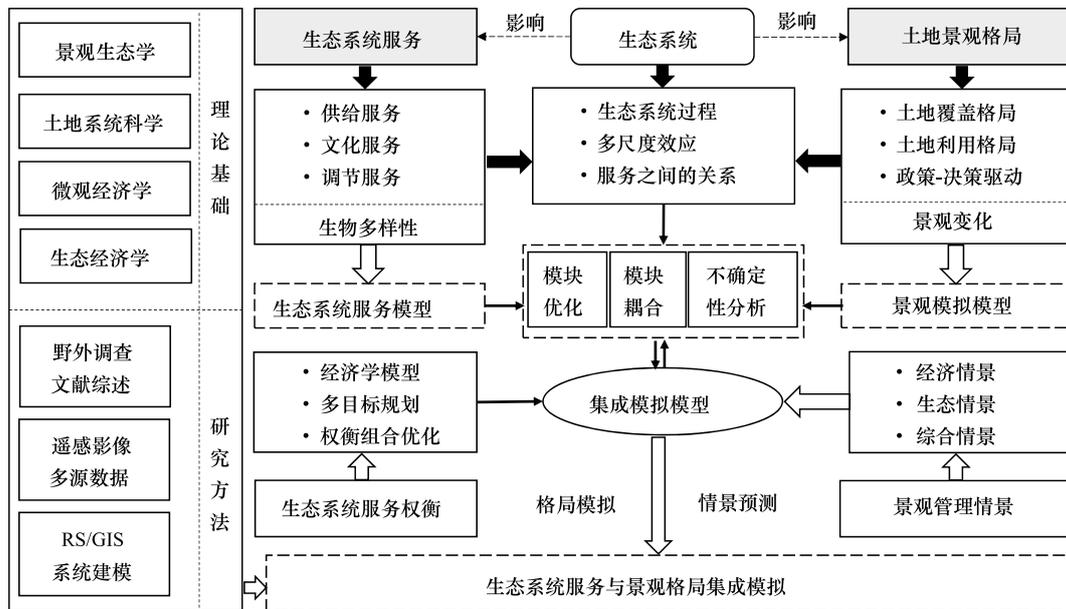


图2 生态系统服务与景观格局集成模拟框架

Fig.2 The framework in the field of integrated simulation of ecosystem services and landscape patterns

4 讨论与结论

生态系统服务与景观格局集成从理论到方法都处于起步阶段,至少有4个亟需发展的优先领域:1)制备长时间序列的多源数据集,用于支持生态系统服务监测和自然资源评估;2)开发生态系统服务的源、汇和空间流模拟模型,分析不同景观格局的生态系统服务空间异质性及其形成机理;3)发展跨尺度的集成评估概念框架和指标集,增加利益相关者参与生态保护的机会;4)定量分析特定尺度的文化、制度因素对生态系统服务的影响。

生态系统服务的可持续提供事关区域和国家的人口生计,是决策者和学术界共同关注的重大问题。生态系统服务与景观格局集成的本质是综合跨学科知识的复杂反馈关系,存在“政策-决策—景观—生态系统服务—社会经济系统”的跨学科知识反馈环,包含系统要素互馈层、模型层和数据层3个维度(图3)。

(1)政策-决策与景观:环境政策-决策中能综合生态恢复工程、生态环境规划和景观管理等多种影响景观格局的生态保护措施^[71]。例如,根据利益相关者对历史时期和当前的景观以及政策/决策的认识,预测不同情景的未来景观格局变化;通过环境政策-决策的优化组合获取最佳的景观格局,为区域生态系统管理提供理论与数据基础。

(2)景观与生态系统服务:景观功能转化为生态系统服务的机制尚未完全清楚,需要利用长期监测数据和模拟模型提高认识^[72]。例如,集成站点、样地、观测网络和遥感等多源景观格局数据,用于确立对不同景观驱动的生态系统服务供给机理的新认识。

(3)生态系统服务与社会经济系统:生态系统服务价值评估能获得收益来源和成本,其结果能纳入社会经济核算账户^[73]。例如,在已有价值测量框架下,集成生态系统服务非货币化估值方法;发展兼顾社会公平和跨时空尺度特征的生态系统服务成本-收益权衡方法。

(4)社会经济系统与政策-决策过程:定量识别不同环境决策的差异性和利益相关者的多元需求,充分引入文化、制度等社会科学领域的知识(如,表2)。

近20年来,国内外相关领域积累了大量的遥感、调查、监测和试验数据,开发了多种集成建模框架和方法

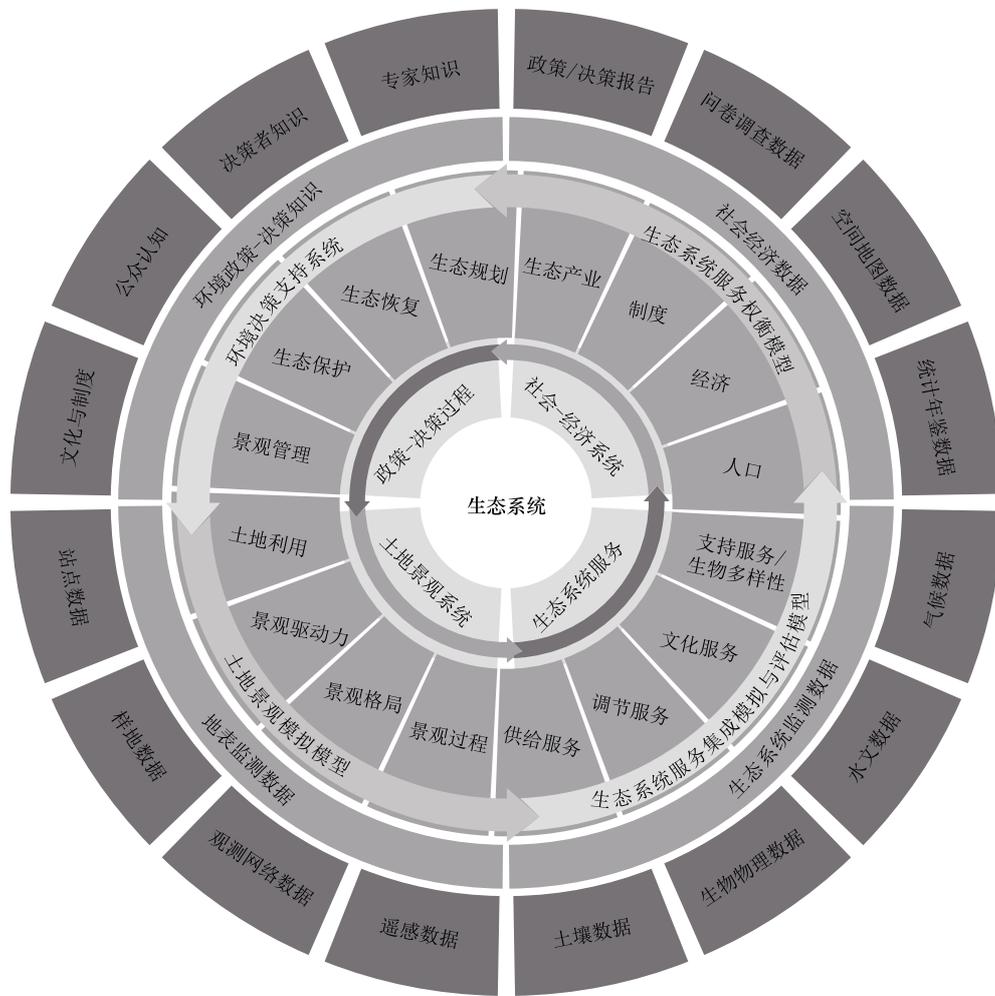


图3 生态系统服务与景观格局集成的知识概念框架

Fig.3 The conceptual framework in the knowledge field of integration of ecosystem services and landscape patterns

工具,为生态系统服务与景观格局集成研究提供了数据、理论和方法支持。主要结论是:1)生态系统服务与景观格局集成的机理和方法是跨学科热点;2)集成方法的核心是结构化、多层次的集成模拟模型,这为综合认识区域生态系统服务与景观格局集成机理提供了可能性;3)集成研究能为区域环境政策-决策制定和生态环境保护等实践应用提供科学参考,更好地应对生态系统服务科学与应用的挑战。

参考文献 (References) :

[1] 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.

[2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute, 2005: 77-101.

[3] 宋敏敏, 张青峰, 吴发启, 吴秉校, 吴驳. 黄土沟壑区小流域景观格局演变及生态服务价值响应. *生态学报*, 2018, 38(8), doi: 10.5846/stxb201705210935.

[4] 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.

[5] IGBP Secretariat. *GLP Science Plan and Implementation Strategy*. IGBP Report No.53/IHDP Report No.19. Stockholm: IGBP Secretariat, 2005.

[6] Adams W M. The value of valuing nature. *Science*, 2014, 346(6209) : 549-551.

[7] King R T. *Wildlife and man*. New York *Conservationist*, 1966, 20(6) : 8-11.

- [8] Helliwell D R. Valuation of wildlife resources. *Regional Studies*, 1969, 3(1): 41-47.
- [9] Wilson C L, Matthews W H. *Man's Impact on the Global Environment: Assessment and Recommendations for Action*. Massachusetts: The MIT Press, 1970.
- [10] De Groot R S. Functions of Nature: Evaluation of Nature in Environmental Planning, Management and Decision Making. *Ecological Economics*, 1992, 14(3): 211-213.
- [11] Noël J F, O'Connor M P. Strong sustainability and critical natural capital // Faucheux S, O'Connor M, eds. *Valuation for Sustainable Development: Methods and Policy Indicators*. Cheltenham; Edward Elgar, 1998.
- [12] Daily G C. Developing a scientific basis for managing Earth's life support systems. *Ecology and Society*, 1999, 3(2): 14.
- [13] Ekins P. Identifying critical natural capital: conclusions about critical natural capital. *Ecological Economics*, 2003, 44(2/3): 277-292.
- [14] De Groot R, Van Der Perk J, Chiesura A, Van Vliet A. Importance and threat as determining factors for criticality of natural capital. *Ecological Economics*, 2003, 44(2/3): 187-204.
- [15] De Groot R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(3/4): 175-186.
- [16] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 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*, 2000, 11(2): 290-292.
- [17] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- [18] 肖玉, 谢高地, 安凯. 莽措湖流域生态系统服务功能经济价值变化研究. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 676-680.
- [19] 石培礼, 李文华. 生态交错带的定量判定. *生态学报*, 2002, 22(4): 586-592.
- [20] 董全. 生态功益: 自然生态过程对人类的贡献. *应用生态学报*, 1999, 10(2): 233-240.
- [21] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. *生态学报*, 2000, 20(1): 9-12.
- [22] Fu B J, Wang S, Su C H, Forsius M. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [23] Anton C, Young J, Harrison P A, Musche M, Bela C, Feld C K, Harrington R, Haslett J R, Pataki C, Rounsevell M D A, Skourtos M, Sousa J P, Sykes M T, Tinch R, Vandewalle M, Watt A, Settele J. Research needs for incorporating the ecosystem service approach into EU biodiversity conservation policy. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(10): 2979-2994.
- [24] Costanza R, De Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [25] 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.
- [26] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 30-38.
- [27] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 曹淑艳, 肖玉. 生态系统服务的供给、消费和价值化. *资源科学*, 2008, 30(1): 93-99.
- [28] 赵志刚, 余德, 韩成云, 王凯荣. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力. *生态学报*, 2017, 37(24): 8411-8421.
- [29] McNeely J A, Miller K R, Reid W V, Mittermeier R, Werner T B. *Conserving the World's Biological Diversity*. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 1990: 1-39.
- [30] Pearce D W. *Blueprint 4: Capturing Global Environmental Value*. London: Earthscan, 1995: 1-20.
- [31] 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.
- [32] De Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [33] Schröter D, Cramer W, Leemans R, Prentice I C, Araújo M B, Arnell N W, Bondeau A, Bugmann H, Carter T R, Gracia C A, De La Vega-Leinert A C, Erhard M, Ewert F, Glendining M, House J I, Kankaanpää S, Klein R J T, Lavorel S, Lindner M, Metzger M J, Meyer J, Mitchell T D, Reginster I, Rounsevell M, Sabaté S, Sitch S, Smith B, Smith J, Smith P, Sykes M T, Thonicke K, Thuiller W, Tuck G, Zaehle S, Zierl B. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 2005, 310(5752): 1333-1337.
- [34] 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 191-199.
- [35] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 赵志强. 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.
- [36] 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.
- [37] Reginster I, Rounsevell M. Scenarios of future urban land use in Europe. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2006, 33(4): 619-636.
- [38] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348.
- [39] Rounsevell M D A, Metzger M J. Developing qualitative scenario storylines for environmental change assessment. *Wiley Interdisciplinary Reviews*:

- Climate Change, 2010, 1(4): 606-619.
- [40] Verburg P H, Van De Steeg J, Veldkamp A, Willemen L. From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(3): 1327-1335.
- [41] Mouchet M A, Rega C, Lasseur R, Georges D, Paracchini M L, Renaud J, Stürck J, Schulp C J E, Verburg P H, Verkerk P J, Lavorel S. Ecosystem service supply by European landscapes under alternative land-use and environmental policies. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2017, 13(1): 342-354.
- [42] Veldkamp A. Investigating land dynamics: future research perspectives. *Journal of Land Use Science*, 2009, 4(1/2): 5-14.
- [43] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 苏常红, 姚雪玲, 刘宇. 国际景观生态学研究新进展. *生态学报*, 2008, 28(2): 798-804.
- [44] Verburg P, Eickhout B, Van Meijl H. A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use. *The Annals of Regional Science*, 2008, 42(1): 57-77.
- [45] Chan K M A, Shaw M R, Cameron D R, Underwood E C, Daily G C. Conservation planning for ecosystem services. *PLoS Biology*, 2006, 4(11): e379.
- [46] Gimona A, Van Der Horst D. Mapping hotspots of multiple landscape functions: a case study on farmland afforestation in Scotland. *Landscape Ecology*, 2007, 22(8): 1255-1264.
- [47] Bennett E M, Balvanera P. The future of production systems in a globalized world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(4): 191-198.
- [48] Turner II B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [49] Rounsevell M D A, Reay D S. Land use and climate change in the UK. *Land Use Policy*, 2009, 26(S1): S160-S169.
- [50] Lavorel S, Grigulis K, Lamarque P, Colace M P, Garden D, Girel J, Pellet G, Douzet R. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology*, 2011, 99(1): 135-147.
- [51] Burkhard B, Kroll F, Müller F, Windhorst W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services—a concept for land-cover based assessments. *Landscape Online*, 2009, 15: 1-22.
- [52] Da Costa C E, Werning I. On the optimality of the Friedman rule with heterogeneous agents and nonlinear income taxation. *Journal of Political Economy*, 2008, 116(1): 82-112.
- [53] Rounsevell M D A, Robinson D T, Murray-Rust D. From actors to agents in socio-ecological systems models. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, 367(1586): 259-269.
- [54] 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.
- [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] Tran L T, Knight C G, O'Neill R V, Smith E R. Integrated environmental assessment of the Mid-Atlantic region with analytical network process. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 94(1/3): 263-277.
- [57] Strager M P, Rosenberger R S. Incorporating stakeholder preferences for land conservation: weights and measures in spatial MCA. *Ecological Economics*, 2006, 57(4): 627-639.
- [58] Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson K A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 48(2): 219-242.
- [59] Villa F, Bagstad K J, Voigt B, Johnson G W, Portela R, Honzák M, Batker D. A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment. *PLoS One*, 2014, 9(3): e91001.
- [60] Bagstad K J, Villa F, Johnson G, Voigt B. ARIES—Artificial Intelligence for Ecosystem Services: A Guide to Models and Data, Version 1.0 Beta. Bilbao, Spain: The ARIES Consortium, 2011.
- [61] Willaarts B A, Volk M, Aguilera P A. Assessing the ecosystem services supplied by freshwater flows in Mediterranean agroecosystems. *Agricultural Water Management*, 2012, 105: 21-31.
- [62] Tallis H, Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1162(1): 265-283.
- [63] Boumans R, Roman J, Altman I, Kaufman L. The multiscale integrated model of ecosystem services (mimes): simulating the interactions of coupled human and natural systems. *Ecosystem Services*, 2015, 12: 30-41.
- [64] Sherrouse B C, Semmens D J, Clement J M. An application of social values for ecosystem services (SOLVES) to three national forests in Colorado and Wyoming. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 68-79.
- [65] Labiosa W, Hearn P, Strong D, Bernknopf R, Hogan D, Pearlstine L. The South Florida ecosystem portfolio model: a web-enabled multicriteria

- land use planning decision support system//Proceedings of the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2010: 1-10.
- [66] Peh K S H, Balmford A, Bradbury R B, Brown C, Butchart S H M, Hughes F M R, Stattersfield A, Thomas D H L, Walpole M, Bayliss J, Gowing D, Jones J P G, Lewis S L, Mulligan M, Pandeya B, Stratford C, Thompson J R, Turner K, Vira B, Willcock S, Birch J C. TESSA: a toolkit for rapid assessment of ecosystem services at sites of biodiversity conservation importance. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 51-57.
- [67] Bolte J P, Hulse D W, Gregory S V, Smith C. Modeling biocomplexity-actors, landscapes and alternative futures. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(5): 570-579.
- [68] Bruijnzeel L A, Mulligan M, Scatena F N. Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrological Processes*, 2011, 25(3): 465-498.
- [69] Condom T, Escobar M, Purkey D, Pouget J C, Suarez W, Ramos C, Apaestegui J, Zapata M, Gomez J, Vergara W. Modelling the hydrologic role of glaciers within a water evaluation and planning system (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Peru). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2011, 8(1): 869-916.
- [70] 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷, 宋晓谕. 基于 LUCC 的生态系统服务空间化研究——以张掖市甘州区为例. *生态学报*, 2013, 33(15): 4758-4766.
- [71] 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全. 北京: 高等教育出版社, 2013: 1-15.
- [72] 欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查评估. *中国科学院院刊*, 2014, 1(4): 462-466.
- [73] Liang Y J, Liu L J. An integrated ecosystem service assessment in an artificial desert oasis of northwestern China. *Journal of Land Use Science*, 2017, 12(2/3): 154-167.