

DOI: 10.5846/stxb201708291562

李婷, 吕一河. 生态系统服务建模技术研究进展. 生态学报, 2018, 38(15): - .

Li T, Lü Y H. A review on the progress of modeling techniques in ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): - .

## 生态系统服务建模技术研究进展

李 婷<sup>1,2</sup>, 吕一河<sup>1,\*</sup>

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**在生态系统服务评估模型的数量、类型及应用大量增加的背景下,为将生态系统服务评估有效整合到决策中,系统比较、甄别不同建模工具并筛选出适合决策需求的生态系统服务评估和模拟方法尤为必要。因此,归纳并总结了国内外现有的生态系统服务评估模型的建模技术,包括:相关关系法、生物-物理过程法以及专家知识法;分别对其原理、差异、优缺点以及适用性进行了详尽阐释。大多数相关模型侧重于统计关系,相对容易创建和扩展,适用于生态系统服务的初始评估;生物-物理过程模型难以构建且不易获取,但提供了探索人-地系统相互作用和长期变化的有效机制;专家知识法有效结合了多种类型的知识体系,关注人类社会与自然系统之间反馈和交互动态的系统整合,但当评估地点发生变化时难以验证。在此基础上,本文介绍了基于上述 3 种建模技术的典型生态系统服务综合评估模型的发展和应用现状。各类建模技术面临着实用性和科学准确性之间的权衡。通过对不同建模技术的梳理与整合分析旨在提升当前生态系统服务研究的决策支撑能力,并为国内相关研究提供参考和借鉴。

**关键词:**生态系统服务;建模技术;模型;决策支持

## A review on the progress of modeling techniques in ecosystem services

LI Ting<sup>1,2</sup>, LÜ Yihe<sup>1,\*</sup>

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

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract:** The number, diversity and application of ecosystem service models has greatly increased over the past decade. To integrate ecosystem service assessment into decision-making processes, systematically comparing and examining the different tools to identify the corresponding approaches that apply to decision requirements are especially essential and important. In this context, we summarized the existing modeling techniques for ecosystem service assessments nationally and internationally, including correlative models, process-based models, and expert-based models. We analyzed their principles, differences, advantages, and disadvantages in detail. Each of these modeling approaches had strengths and weaknesses that made them a better fit to different decision contexts: (1) the correlative models focused on existing statistical relationships, which were easy to use, to create and to revise, making these types of models useful in initial or rapid assessments. However, the weakness was that they could dramatically fail in data-poor situations. (2) Process-based models, which represented a scientific understanding of key dynamics for ecosystem services, were difficult to produce and to access but allowed the exploration of interactions and long-term dynamics in human-earth systems. (3) Expert-based models could facilitate to achieve the incorporation of diverse types of expert knowledge into ecosystem service assessments, which was particularly useful for bridging multiple knowledge systems as well as focusing on the interactions among people and nature systems. However, the expert-based models were often only partial and were difficult to verify from place to

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFC0501601)

收稿日期:2017-08-29; 网络出版日期:2018-00-00

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

place. Furthermore, the applications of typical ecosystem service assessments models based on the three techniques were systematically reviewed and discussed. Our study highlighted that these modeling approaches had to compromise between usability and scientific accuracy, which meant that practitioners need to weigh their requirements for specific projects carefully before deciding on the appropriate tools. The analysis and integration of different modeling techniques would enhance the capabilities of decision support for ecosystem services assessments, and help to provide information and reference for domestically relevant research.

**Key Words:** ecosystem services; modeling techniques; models; decision support

生态系统服务的概念提出以来,自然生态系统对人类福祉的直接或间接贡献作用已得到广泛认可。近年来,随着研究方法的革新及研究内容的深入,将生态系统服务评估纳入规划和决策框架被视为实现区域资源可持续分配的必要手段<sup>[1]</sup>。例如,英国启动了以生态系统服务评估作为国家土地利用战略重要组成部分的区域试点项目<sup>[1-2]</sup>;欧盟水框架指令(Water Framework Directive, WFD)中强调生态系统服务为资源规划提供信息的潜力,并且提出将生态系统服务评估纳入政策和法律的重要性<sup>[3]</sup>。“全国生态环境十年变化(2000—2010年)调查评估”中生态系统服务评估是关键组成部分,为我国生态文明建设与生态保护工作提供了可靠、及时的科学依据<sup>[4]</sup>。

生态系统服务评估及制图能够有效识别服务提供的空间单元、权衡和协同作用的发生区域以及亟需采取针对性管理的优先区域<sup>[1]</sup>。对于生态系统服务决策支持的社会与政策需求不断增长,成为其研究发展的主要动力<sup>[5]</sup>。在这一过程中,通过建模实现生态系统服务评估及空间制图起着关键作用。自千年生态系统评估报告发布以来,全球范围内广泛开展的生态系统服务研究为定量评估、模型模拟、情景分析积累了大量理论和应用研究成果。生态系统服务评估模型的数量、类型及应用在过去十年中均大量增加。各类基于 GIS 的决策支持工具,试图将地理学、生态学、经济学等充分整合,以空间显性的方式支持区域规划和生态保护<sup>[6]</sup>。然而,不同的建模方法产生不同的管理策略<sup>[7]</sup>。目前,对各类建模技术仍缺少系统整合与比较研究,各类模型如何有效适应不同决策背景下的生态系统服务评估任务尚不清晰。基于此,本文通过系统甄别生态系统评估中不同建模方式的原理、差异、优缺点以及适用性,对当前典型模型做出比较分析,旨在为提升生态系统服务定量研究及其决策支撑能力提供借鉴。

## 1 建模技术

迄今为止,涉及生态系统服务评估的模型及工具层出不穷,其建模方式可归为以下 3 类(图 1):(1)基于指标的相关模型(Correlative models), (2)基于生物物理过程的模型(Process-based models)以及(3)基于专家知识的模型(Expert-based models);前两种属于定量建模方法,最后一种属于半定量半定性建模方法<sup>[8]</sup>。IPBSE 最新研究报告中根据 Cuddington 等人的研究,对 3 种建模方式的潜在效益进行比较,认为基于生物物理过程的建模技术具有更高的透明度并能够实现不确定性分析等特点,在不断变化的管理和决策环境中更具优势<sup>[7-8]</sup>。Landuyt 分析了贝叶斯网络技术的原理及特点,认为尽管面临着灵活性较差、无法形成反馈回路等挑战,但由于其明确的技术优势(如将经验数据与专家知识相结合并在数据稀缺时仍能运行),贝叶斯网络技术在未来生态系统服务建模过程中仍将做出重要贡献<sup>[9]</sup>。此外,Nemec 综述了基于 GIS 的生态系统服务评估主要模型,包括评估生态系统生态生产功能的 InVEST 模型、量化服务空间流动的 ARIES 及 EcoMetrix 模型,以及评估服务优先级的 ESValue、EcoAIM 和 SolVES 模型,并着重从模型的可获取性、评价尺度及运行时间做出比较<sup>[10]</sup>。上述研究从不同视角阐述了各类建模技术或模型的优势和劣势。基于此,本文对三种建模方式的构建难易程度、模型可获取性、数据需求及是否包含不确定性分析等 8 项指标进行了整合与对比(表 1)。

### 1.1 相关关系法

相关关系法通常采用土地利用/土地覆盖或某种生态参量(如物种分布、植被覆盖度、植被净初级生产力

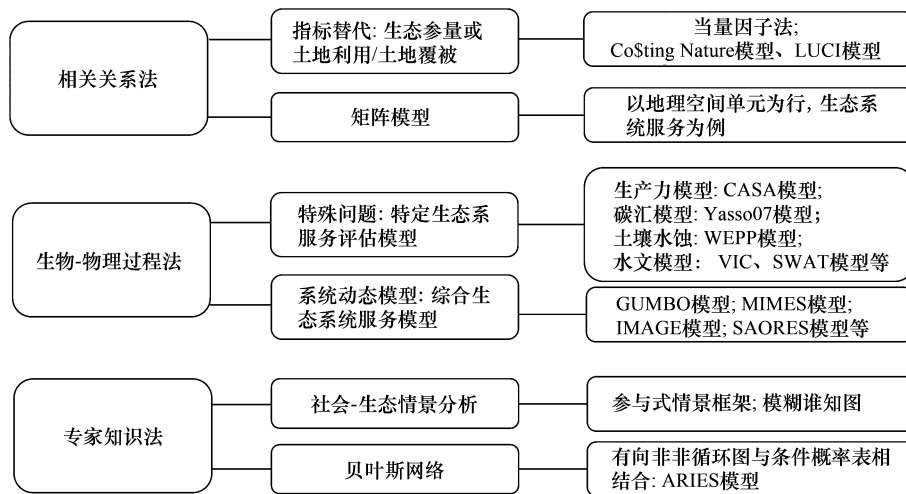


图1 生态系统服务评估主要建模技术

Fig.1 The key modeling techniques for the assessments of ecosystem service

等)表征生态系统服务的大小(图1)。例如,研究者基于不同土地利用/土地覆盖类型的当量因子法在全球范围内广泛开展了生态系统服务价值评估<sup>[11-12]</sup>,或采用多年生植被空间分布、植被经初级生产力来评估碳储存、气候调节等生态系统服务<sup>[13-14]</sup>。最近的研究中,细化土地利用/覆盖数据(如提高其空间或时间分辨率)并与其他信息相结合,能够更准确地表示生态系统结构和过程、诠释生态系统服务的空间异质性,使得此类建模方法得到了改进。Alkemade 等以 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格为基本单元,采用土地覆被/土地利用数据结合气候、地形、土壤属性及人口密度数据实现了东欧地区多种生态系统服务评估<sup>[15]</sup>。谢高地等在当量因子法基础上进行本地化处理 and 时空变异性的改进;一方面,采用 Meta 分析方法减少单纯依靠专家经验打分导致的不确定性;另一方面,将生态系统类型和服务类别进行细分,提高评估的空间分辨率,实现了中国 14 种生态系统类型及其 11 类生态服务价值在时间(月尺度)和空间(省域尺度)上的动态评估<sup>[16]</sup>。

矩阵模型是基于土地利用/土地覆盖发展起来的一类特殊的相关关系模型。以地理空间单元和生态系统服务分别作为行列的矩阵模型根据不同土地覆盖类型模拟生态系统服务的供给能力和服务需求,并在统计分析、模型分析、社会经济数据或访谈数据等基础上进行修正<sup>[17]</sup>。Burkhard 及其团队于 2009 年创建及运用该技术,并在近年的研究中逐步改进;通过补充土壤类型图<sup>[18]</sup>、植被和生物区划图<sup>[19]</sup>、水文数据<sup>[20]</sup>或遥感数据<sup>[21]</sup>提高地理空间单元(即矩阵模型中的“行”)的评估基础;以生态完整性作为先决条件,根据欧洲环境署通用生态系统服务分类系统(Common International Classification of Ecosystem Services, CICES)<sup>[22]</sup>修正矩阵中“列”所评估的生态系统服务清单,构建适用于多种生物群落和社会-生态系统的矩阵模板。由于能够快速绘制生态系统服务需求及供给分布、评估结果直观且易于理解,矩阵模型在区域政策的环境评估中非常受欢迎,是近年来广泛使用的生态系统服务评估技术之一。其应用限制主要集中于以下 3 方面:(1)对土地利用/土地覆被空间和时间异质性反映不足;(2)无法体现生态系统服务供应能力的尺度效应;(3)缺乏适当的不确定性分析<sup>[23-24]</sup>。针对上述质疑,Burkhard 等人正在提出解决方案,通过改善可靠性、一致性和有效性等措施解决矩阵模型的主要缺陷,以促进该技术成为沟通自然科学与社会科学的桥梁、专家体系与决策者之间的合作工具<sup>[5]</sup>。

对数据需求和专业技术要求简单的相关模型在专业知识背景缺乏时能够实现生态系统服务的快速评估,具有简单易行、透明度高、结果可进行外推等优点(表1)。然而,由于缺乏对时间变化、生态系统外部变化驱动因素或社会-生态反馈相互作用的考虑,在不同环境下往往被泛化使用,评估结果的不确定性高,可信度经常受到质疑(表1)<sup>[25]</sup>。因此,基于相关关系的建模方法应当用作生态系统服务的初始评估;从评估的尺度上看,更适合大尺度(全球或国家)的生态系统服务评估;从服务对象上看,能够定量辨识评价单元生态系统服



务提供能力的相对强弱,为满足空间区划和规划任务的基本需求服务<sup>[26]</sup>。

### 1.2 生物-物理过程法

根据国内外现有的生态系统服务评估方法理论基础和技术差别,过程模型分为特定生态系服务的评估(预测)模型以及基于系统动力学的综合生态系统服务模型(图1)。侧重于林学、水文学和农学等专业学科中长期研究,发展出诸多针对特定生态系统服务的评估模型。例如,以光能利用率计算植被净初级生产力(NPP)的CASA(Carnegie Ames-Stanford Approach)模型,广泛应用于国内外研究中<sup>[27-29]</sup>;定量评估土壤碳汇能力的Yasso07模型成功应用于我国黄土高原地区的试点研究中,推动了生态恢复驱动下土壤碳固定服务的时间动态、空间格局和影响因素研究<sup>[30-32]</sup>。另一方面,在大规模自然资本与人类社会多重交互的背景下,评估(预测)生态系统功能如何为人类提供服务和效益的综合系统动力模型应运而生。最早由Roelof Boumans等开发了首个模拟人类技术、经济生产和福利、生态系统产品和服务的动态反馈综合地球系统——GUMBO(Global Unified Meta model of the Biosphere)模型,将全球分为五大圈层(人类圈、生物圈、大气圈、水圈和岩石圈)、覆盖十一个生物群系,并对每个生物群系的11项生态系统产品及服务功能进行评估和预测<sup>[33]</sup>。多尺度综合地球系统模型(Multiscale Integrated Earth Systems Model, MIMES)建立在GUMBO模型之上,采用空间显式方法呈现不同时间及空间尺度下多种生态系统服务评估结果<sup>[34]</sup>。近年来,Fiksel等开发了三重价值模型(Triple Value Model),模拟产业、社会和环境之间的动态联系和资源流动<sup>[35]</sup>。美国环保局在这一模型框架下正在开展跨学科可持续性研究项目。Hu等开发了名为SAORES的区域生态系统服务空间决策支持工具,为情景分析和优化规划设计提供了平台,构建了提高区域景观生态规划和管理效率的系统性方法<sup>[36]</sup>。

基于过程的建模方法根据对生态学理论认识揭示为人类提供服务的生态系统功能和生物物理过程,旨在反映自然资本及生态系统服务流动过程;其中涵盖社会-生态反馈作用以及不同尺度的相互作用,与依赖于数据收集的统计方法或相关关系法相比,尤为适合评估外部驱动因素变化时生态系统服务的响应,如不同管理政策下生态系统服务变化,并在预测全球变化的影响方面有着显著的优势<sup>[7]</sup>。此外,由于模型透明度高,可以通过灵敏度和不确定性分析观察数据,并进行校准和验证。然而,各类过程模型开发的时间成本和知识成本要求较高(表1)。尽管开源的单项生态系统服务评估模型在国内外得到良好应用,但对大多数决策需求来说,生态系统服务评估的贡献来自于多项生态系统服务簇协同/权衡的评估结果。另一方面,综合系统动力模型的低开放性仍然是其应用和推广的瓶颈。例如,GUMBO、MIMES模型使用商业软件包Simile开发, Triple Value Model在Vensim中实现。这些建模工具的代码非公开,模型仅部分可用。因此,综合系统动力模型在开源软件中的开发和可用性是未来研究的重要领域。

### 1.3 专家知识法

具有专业教育或经验背景的研究人员对评估内容充分了解,由学术界达成一致认可或法定采纳其意见是专家知识法的基本假设,是一种半定性半定量的“软系统”的建模方式。在没有理论或足够数据支撑的情况下,往往需要整合不同类型的数据和专家意见,以实现涉及多个领域的研究内容,如气候变化、自然灾害的预测或模拟等<sup>[21]</sup>。生态系统服务评估中与上述研究类似,涉及生态、社会、经济等多个系统,具有高度的交互性、复杂性和不确定性等特征。目前,正在开展多种“软系统”建模方式模拟生态系统服务(图1),主要包括:社会-生态情景分析(Social-ecological scenario analysis)和贝叶斯网络(Bayesian belief networks)。

情景分析技术的历史可追溯至20世纪70年代,最初主要服务于军事和产业布局需求;在过去25年,越来越多地应用于生物多样性评估、保护区管理、气候变化、生态系统服务及其与人类福祉关系等环境研究领域<sup>[37]</sup>。社会-生态情景分析关注生态系统服务和人类福祉之间的动态变化,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,分析各种生态系统服务之间的动态变化,是研究生态系统服务权衡/协同的常见方法之一<sup>[38]</sup>。千年生态系统评估整合了从局地到全球、多尺度综合的生态系统服务与人类福祉关系,其影响最为广泛、深刻<sup>[39]</sup>。在这之后,全球范围内开展了多项社会-生态情景模拟。例如,为应对保护区内部和周围地区发展情景可能造成的矛盾和不确定性,西班牙西南部保护区采用参与式情景规划框架探讨生态系统服务和

人类福祉共存的条件、趋势、权衡和未来社会的认知<sup>[40]</sup>。近年来,社会-生态情景分析研究重点集中于历史重现与未来预测相结合<sup>[41]</sup>、情景方法的评估与扩展应用<sup>[42]</sup>以及模糊认知图的构建<sup>[43]</sup>。社会-生态情景的建模为不同利益相关者解决生态变化与人类福祉之间关系的权衡提供了多重选择。然而,情景设置并不严格,且创建过程耗时较长,需要相关利益者进行参与式建模练习。这种建模技术的推广需要更加易于访问方式(如通过 web 浏览器),并在多种情景实践中构建,以评估不同环境和目标的效用<sup>[23]</sup>。目前,已经制定若干进行社会-生态情景项目的指导手册,但需要进一步提升情景过程的管理和开发工具的普及性、多样性和指导价值。

贝叶斯网络由指示模型变量关系的有向非循环图和表示图中链接强度的条件概率表组成;前者基于相关模型或过程模型的定量结果,后者根据专家知识或利益相关方的需求判断<sup>[44]</sup>。贝叶斯网络将定量与概率定性数据相结合,模拟生态系统服务的流动过程,非常适用于数据有限情况下不同设计需求的模拟,是一种有潜力的情景构建工具<sup>[9,44]</sup>。Landuyt 等回顾了 2000 年以来采用该方法进行生态系统服务评估的 47 项研究工作,发现 2/3 的研究集中于水生生态系统服务的评估,包括水生生物遗传、文化娱乐、水量供给等几项有限服务,而侵蚀控制、大气调节、碳储存等调节服务涉及较少<sup>[9]</sup>。原因之一是当前已有多种过程模型或相关关系法定量评估上述调节服务;另一方面,尽管贝叶斯网络提供了综合多项生态系统服务的研究框架,但对其整合研究仍处于初级阶段。采用贝叶斯网络建模在数据稀缺情况下能够组合不同类型的数据进行运算,但由于建模过程中使用了诸多变量及表达其关系的链接,使得评估服务的反馈过程十分困难。

总体来说,专家知识法的显著优势在于将不同类型的专家系统纳入生态系统服务模型构建,确保了采用最佳可用知识及验证方法,从而更好地处理多个生态系统服务在社会经济领域的评估,因此尤其适用于跨学科的综合生态系统服务评估。另一方面,开发更简单、更有效、更透明的参与式生态系统服务评估模型是专家知识法在未来研究中面临的主要挑战(表 1)。

表 1 不同建模技术的优缺点比较

Table 1 Comparison of the advantages and disadvantages among different modeling techniques

建模技术 Modeling techniques	相关关系法 Correlative models	生物-物理过程法 Process-based models	专家知识法 Expert-based models
构建难易度 Ease of development	*	***	**
可获取性 Model availability	***	**	**
快速评估 Allows rapid assessment	**	*	***
数据需求 Data requirements	**	***	*
透明度 Transparency	***	***	*
不确定性分析 Integrates the uncertainty	*	***	*
不同管理方式的适用性 Applicability for alternative management strategies	*	***	*
整合社会和文化因素 Incorporate social and cultural factors	*	**	***

\* 代表该项的程度,如构建难易程度最低时为\*,最高时为\*\*\*

## 2 基于不同建模方法的典型生态系统服务评估模型

研究从建模框架入手,列举了基于上述建模方法、正在发展的典型生态系统服务评估模型原理及应用现状,并描述了其建模类型、评估的最终服务及输出尺度(表 2),包括:生物物理过程法与相关关系法相结合的 InVEST 模型、基于过程的 IMAGE 与 SAORES 模型、基于专家知识的 ARIES 模型以及采用相关关系法的 Co \$ ting Nature 与 LUCI 模型。

### 2.1 InVEST 模型

InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型将生境或土地利用的空间范围作为生态系统服务生产的预测因子,通过生物物理过程的简化来反映生态系统结构和功能对服务流动及价值的影

响,是目前广泛应用的综合生态系统服务评估及权衡模型。自2006年起,该模型由自然资本项目开发、修正并不断扩展其评估模块。截至2016年(InVEST 3.3.3),基于生态生产过程的概念,模型更新至包括4项支持服务及14项最终服务在内的涵盖陆地、淡水及海洋生态系统共18项服务评估模块(表2)<sup>[45]</sup>。InVEST模型模块化的设计和情景式的数据输入为政策管理与气候情景探索多种可能结果,并为不同部门的利益相关方权衡多项生态系统服务结果提供了有效的工具。多尺度的数据输入及结果输出使得该模型在美洲、非洲、亚洲等20个国家和地区的相关研究中得到广泛应用<sup>[46]</sup>。在中国,对该模型的应用更加侧重于模拟不同土地利用策略的生态系统服务功能差异,以及对多种生态系统服务权衡/协同关系的定量辨识,为化解区域景观和土地利用规划中潜在的生态系统服务矛盾提供相对优化的解决方案<sup>[47-49]</sup>。

表2 基于3种建模方法的典型生态系统服务评估模型概述

Table 2 Summarization of the typical ecosystem service models based on the three modeling techniques

模型 Models	建模技术 Modeling techniques	服务 Types of services			输出尺度 Scale of outputs
		供给 Provisioning services	调节 Regulating services	文化 Cultural services	
生态系统服务综合评估及权衡模型 InVEST	生物物理过程法、相关关系法	边缘碳库退化、水量供给、海岸及海浪风能、渔量供给、粮食供给	固碳及碳储、海岸碳通量、养分输送、侵蚀控制、海岸防洪、水产养殖调节	休闲和旅游、美学	多尺度:国家、区域、景观或局地尺度
全球环境变化综合评估模型 IMAGE	生物物理过程法	农业生产、林木制品供给、水量供给、野生动植物供给	碳通量、海洋碳循环、水蚀调控、空气污染、洪水调控、土壤湿度、授粉	—	全球或 0.5°×0.5° 格网
区域生态系统服务功能空间评估与优化工具 SAORES	生物物理过程法	产水、粮食供给	侵蚀控制、碳固定	—	区域
生态系统服务的人工智能模型 ARIES	专家知识法	水量供给、渔量供给	碳固存和储存、洪水调节、侵蚀控制	邻近度、美学景观、文化娱乐	多尺度:国家、区域、景观或局地尺度
自然资本核算工具 Co \$ ting Nature	相关关系法	水量供给	碳固存和储存、灾害控制	休憩与娱乐、自然旅游	全球
土地利用和功能指标模型 LUCI	相关关系法	农业生产	固碳、洪水调控、侵蚀调节、泥沙输送、水质调节	—	全球

InVEST:生态系统服务综合评估及权衡模型, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs; IMAGE:全球环境变化综合评估模型, Integrated Assessment of Global Environmental Change; SAORES:区域生态系统服务功能空间评估与优化工具, Spatial Assessment and Optimization Tool for Regional Ecosystem Services; ARIES:生态系统服务的人工智能模型, Artificial Intelligence for Ecosystem Services; Co \$ ting Nature:自然资本核算工具; LUCI:土地利用和功能指标模型, Land Utilisation and Capability Indicator

## 2.2 IMAGE 模型

IMAGE(Integrated Assessment of Global Environmental Change)模型通过对不同学科、生态系统及其评价指标的整合,评估人类活动对自然生态系统和自然资源的影响,用于分析大尺度(全球)、长期(截止2100年)的自然环境变化和人类社会可持续发展交互作用,是一项人类与自然系统相互作用的综合建模框架<sup>[50]</sup>。IMAGE将不同服务的供给量与人类所估计的盈余或赤字的最低值进行比较,其中考虑到资源价值及可用性,并预测了能源、土地、水资源及其他自然资源的变化。例如,在未来的预测中,该模型计算并考虑空气、水和土壤中的排放物、碳库及化石燃料枯竭或退化以及气候变化等影响。模型可直接进行计算的生态系统服务包括粮食供给、水量供给、碳固存和洪水调节等;而野生食物供给、侵蚀控制、授粉等服务则需要额外的环境变量,尤其是来自其他模型的精细土地利用强度数据<sup>[8]</sup>。目前,IMAGE被应用于以下科研及政策支持项目:(1)全球环境问题的综合评估:如参与千年生态系统评估工作,IMAGE重点关注生态系统服务对人类发展的支持作用<sup>[50]</sup>;(2)生物多样性、气候、能源和生物能源等专题评估:如服务于IPCC评估报告,IMAGE被用于探索全球减排情景模拟<sup>[51]</sup>;(3)欧盟战略政策支持:如IMAGE用于探讨气候变化减排目标和制度从而支持欧盟温室气体



体减排政策的制定<sup>[50]</sup>。

### 2.3 SAORES 模型

SAORES(Spatial Assessment and Optimization Tool for Regional Ecosystem Services)模型是一套以 GIS 平台为基础、多目标优化遗传算法(NSGA-II)为基本框架、集成 4 种生态系统服务模块的区域生态系统管理和规划决策支持工具。该模型针对中国黄土高原生态恢复和管理背景下区域产水、侵蚀控制、碳固定以及粮食供给服务的评价和优化而设计(表 2)<sup>[36]</sup>。基于生态系统服务和社会经济(如退耕补偿最小)等多目标权衡的显著特点,SAORES 能够为退耕还林工程背景下其他区域的关键生态系统服务最大化及土地利用格局优化提供借鉴。但由于重点关注情景构建、权衡分析和多目标优化规划设计,模型忽略了上述服务评估的准确性校验及不确定性分析。尽管还需进一步发展和完善,但该模型在采用空间多目标优化方法以应对生态系统服务量化挑战方面做出了积极努力,对于改善生态系统服务、支撑生态系统恢复与管理方面具有一定的应用潜力<sup>[52]</sup>。今后,为进一步发展和完善其服务范围 and 评估功能,SAORES 将囊括更多其他生态系统服务评估模块,并拓展新的服务权衡分析功能,以实现区域生态系统适应性管理的目标<sup>[36]</sup>。

### 2.4 ARIES 模型

由美国佛蒙特大学开发的 ARIES(Artificial Intelligence for Ecosystem Services)模型,结合多尺度过程和贝叶斯概率模型,模拟多项生态系统服务从供给区到服务受益区的流动过程。ARIES 模型是一种新颖的方法和软件平台,与以往生态系统服务定量和估价方法有 4 个关键差异:(1) ARIES 提供了智能建模平台,可以根据计算机建模语言进行内部定义,从而对生态系统服务评估的空间、时间、文化或其他环境动态做出改变;(2)通过网页访问和运行该模型,所有计算过程均由单独的模型服务器处理,计算结果通过网页界面返回用户;(3)其建模语言基于概率贝叶斯方法,能够对数据输入和结果输出的不确定性进行明确表达,并且在数据稀缺时模型也能够运行;(4)ARIES 通过描述服务潜在供应位置及功能大小(来源)、受益者(用户)、服务流量(汇)之间的流动,为生态系统服务供需矛盾和服务的空间冲突提供权衡管理对策<sup>[53]</sup>。目前,该模型仅被应用于美国、拉丁美洲和非洲七个案例区的八项生态系统服务量化和空间绘制(表 2)<sup>[54-55]</sup>。

### 2.5 Co \$ ting Nature 与 LUCI 模型

Co \$ ting Nature 模型在网页上实现,包含详细的全球数据集、生物物理和社会经济空间模型以及气候和土地利用的情景;通过结合 80 多个输入图,估算碳储存、产水量、旅游及缓解自然灾害 4 项服务的维护成本,从而确定其保护优先权;但无法支持单独服务评估、权衡或估值<sup>[56]</sup>。LUCI(Land Utilisation and Capability Indicator)模型基于土地利用和土壤信息,重点关注农业景观及其生态系统服务,如粮食生产、侵蚀控制、泥沙输送、水质保护等服务,具有显著的应用潜力,但目前仅为非营利组织免费提供,没有得到广泛使用<sup>[57]</sup>。Co \$ ting Nature 和 LUCI 模型均是基于生态系统状态而评估其服务能力的相关关系模型,可用于生态系统服务供给的初始评估,作为深入建模或情景模拟的起点。这类建模工具的开发目前仍处于起步阶段且具有诸多应用限制。

总体来说,根据上述建模方式开展的研究仍面临以下关键问题的挑战:(1)对生态系统如何提供多项服务以及服务交互认知较为有限,从而导致不同模型的算法、产出和不确定性之间的差异较大。(2)数据输入的分辨率存在相当大的差异,反映在生态系统服务制图质量的泛化和简化。(3)超过一半的调节服务评估采用土地覆盖、遥感和地形数据模拟生态系统服务,但与生物多样性模型联系不足。缺乏空间生物多样性数据,是将生物多样性纳入生态系统服务模型面临的主要挑战<sup>[58]</sup>。(4)生态系统服务制图研究是将生态系统服务评估纳入到区域生态环境保护与决策制定中的重要组成部分<sup>[59]</sup>。但目前,生态系统服务空间绘制通常显示服务潜在发生区而非实际的服务,在一定程度上增加了其结果解释的难度。

## 3 结语

对生态系统服务建模方法的分析明确了不同工具的差异,特别是在准确性、数据需求和交互性等方面。

基于生态参数和土地利用的相关模型侧重于现有的统计关系,矩阵模型侧重于空间模式,这两者相对容易创建和修改,可用于生态系统服务初始或快速评估。贝叶斯网络侧重于专家知识,关注人与自然之间反馈和交互动态系统模型的整合;社会-情景模拟相对有效地结合了多种类型的知识,但当评估地点发生变化时难以验证。系统动力学模型难以构建且不易获取,但提供了探索人-地系统相互作用和长期变化的有效机制。迄今为止,各类生态系统服务建模技术不得不在实用性和科学准确性之间进行权衡,这意味着在决定适当的方法之前,研究者需要仔细分析具体的研究需求;另外,在许多生态系统评估工作中,不同方法能够相互补充及支持。因此,亟需建立更加标准化的整合方法。生态系统变化对人类福祉影响的建模仍处于初级阶段,开发相关工具需要政策制定者与自然和社会科学家进行跨学科的合作。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Vorstius A C, Spray C J. A comparison of ecosystem services mapping tools for their potential to support planning and decision-making on a local scale. *Ecosystem Services*, 2015, 15: 75-83.
- [ 2 ] Spray C J. Scottish borders pilot regional land use framework. UK: Scottish Borders Council, 2014.
- [ 3 ] Vlachopoulou M, Coughlin D, Forrow D, Kirk S, Logan P, Voulvoulis N. The potential of using the Ecosystem Approach in the implementation of the EU Water Framework Directive. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471: 684-694.
- [ 4 ] 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, 29(4): 462-466.
- [ 5 ] Jacobs S, Burkhard B, Van Daele T, Staes J, Schneiders A. 'The matrix reloaded': a review of expert knowledge use for mapping ecosystem services. *Ecological Modelling*, 2015, 295: 21-30.
- [ 6 ] Bagstad K J, Semmens D J, Winthrop R. Comparing approaches to spatially explicit ecosystem service modeling: A case study from the San Pedro River, Arizona. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 40-50.
- [ 7 ] Cuddington K, Fortin M J, Gerber L R, Hastings A, Liebhold A, O'Connor M, Ray C. Process-based models are required to manage ecological systems in a changing world. *Ecosphere*, 2013, 4(2): 1-12.
- [ 8 ] IPBES. The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services. Bonn, Germany: IPBES, 2016.
- [ 9 ] Landuyt D, Broeckx S, D'Hondt R, Engelen G, Aertse J, Goethals P L M. A review of Bayesian belief networks in ecosystem service modelling. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 46: 1-11.
- [ 10 ] Nemeček K T, Raudsepp-Hearne C. The use of geographic information systems to map and assess ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 2013, 22(1): 1-15.
- [ 11 ] Costanza R, Chichakly K, Dale V, Farber S, Finnigan D, Grigg K, Heckbert S, Kubiszewski I, Lee H, Liu S, Magnuszewski P, Maynard S, McDonald N, Mills R, Ogilvy S, Pert P L, Renz J, Wainger L, Young M, Ziegler C R. Simulation games that integrate research, entertainment, and learning around ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2014, 10: 195-201.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Schulp C J E, Alkemade R, Goldewijk K K, Petz K. Mapping ecosystem functions and services in Eastern Europe using global-scale data sets. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2012, 8(1/2): 156-168.
- [ 16 ] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521-535.
- [ 19 ] Vihervaara P, Kumpula T, Ruokolainen A, Tanskanen A, Burkhard B. The use of detailed biotope data for linking biodiversity with ecosystem services in Finland. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2012, 8(1/2): 169-185.
- [ 20 ] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services-Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological*



- Indicators, 2012, 21: 67-79.
- [21] Kaiser G, Burkhard B, Röemer H, Sangkaew S, Graterol R, Haitook T, Sterr H, Sakuna-Schwartz D. Mapping tsunami impacts on land cover and related ecosystem service supply in Phang Nga, Thailand. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2013, 13(12): 3095-3111.
- [22] Haines-Young R, Potschin M. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES), version 4.3. Report to the European Environment Agency EEA. (<https://cices.eu/>), 2013.
- [23] Burkhard B, Kandziora M, Hou Y, Müller F. Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification. *Landscape online*, 2014, 34: 1-32.
- [24] Burkhard B, Müller A, Müeller F, Grescho V, Anh Q, Arida G, Bustamante J V, Van Chien H, Heong K L, Escalada M, Marquez L, Truong D T, Villareal S, Settele J. Land cover-based ecosystem service assessment of irrigated rice cropping systems in southeast Asia—an explorative study. *Ecosystem Services*, 2015, 14: 76-87.
- [25] Eigenbrod F, Armsworth P R, Anderson B J, Heinemeyer A, Gillings S, Roy D B, Thomas C D, Gaston K J. The impact of proxy-based methods on mapping the distribution of ecosystem services. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(2): 377-385.
- [26] 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.
- [27] Van Der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, Collatz G J, Kasibhatla P S, Arellano A F Jr. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(11): 3423-3441.
- [28] 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.
- [29] Schaefer K, Collatz G J, Tans P, Denning A S, Baker I, Berry J, Prihodko L, Suits N, Philpott A. Combined simple Biosphere/Carnegie-Ames-Stanford approach terrestrial carbon cycle model. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(G3): G03034.
- [30] Tuomi M, Rasinmäki J, Repo A, Vanhala P, Liski J. Soil carbon model Yasso07 graphical user interface. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(11): 1358-1362.
- [31] Lü N, Akujärvi A, Wu X, Liski J, Wen Z M, Holmberg M, Feng X M, Zeng Y, Fu B J. Changes in soil carbon stock predicted by a process-based soil carbon model (Yasso07) in the Yanhe watershed of the Loess Plateau. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 399-413.
- [32] Wu X, Akujärvi A, Lü N, Liski J, Liu G H, Wang Y F, Holmberg M, Li F, Zeng Y, Fu B J. Dynamics of soil organic carbon stock in a typical catchment of the Loess Plateau: comparison of model simulations with measurements. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 381-397.
- [33] Boumans R, Costanza R, Farley J, Wilson M A, Portela R, Rotmans J, Villa F, Grasso M. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 529-560.
- [34] 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.
- [35] Fiksel J, Bruins R, Gatchett A, Gilliland A, Ten Brink M. The triple value model: a systems approach to sustainable solutions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2014, 16(4): 691-702.
- [36] Hu H T, Fu B J, Lü Y H, Zheng Z M. SAORES: a spatially explicit assessment and optimization tool for regional ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 547-560.
- [37] Thompson J R, Wiek A, Swanson F J, Carpenter S R, Fresco N, Hollingsworth T, Spies T A, Foster D R. Scenario studies as a synthetic and integrative research activity for long-term ecological research. *BioScience*, 2012, 62(4): 367-376.
- [38] 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.
- [39] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Volume 2: Scenarios; Findings of the Scenarios Working Group. Washington DC: Island Press, 2005.
- [40] Palomo I, Martín-López B, López-Santiago C, Montes C. Participatory scenario planning for protected areas management under the ecosystem services framework: the doñana social-ecological system in Southwestern Spain. *Ecology and Society*, 2011, 16(1): 23.
- [41] Kok K, Van Vliet M, Bäerlund I, Dubel A, Sendzimir J. Combining participative backcasting and exploratory scenario development: experiences from the SCENES project. *Technological Forecasting and Social Change*, 2011, 78(5): 835-851.
- [42] Daw T M, Coulthard S, Cheung W W L, Brown K, Abunge C, Galafassi D, Peterson G D, McClanahan T R, Omukoto J O, Munyi L. Evaluating taboo trade-offs in ecosystems services and human well-being. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(22): 6949-6954.
- [43] Aguilera P A, Fernández A, Fernández R, Rumí R, Salmerón A. Bayesian networks in environmental modelling. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(12): 1376-1388.
- [44] Haines-Young R. Exploring ecosystem service issues across diverse knowledge domains using Bayesian Belief Networks. *Progress in Physical*

- Geography, 2011, 35(5): 681-699.
- [45] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl A L, Rogers L, Bierbower W. InVEST+VERSION+ User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2016: 8-11.
- [46] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. 地理研究, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [47] 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.
- [48] Zheng Z M, Fu B J, Hu H T, Sun G. A method to identify the variable ecosystem services relationship across time: a case study on Yanhe Basin, China. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1689-1696.
- [49] 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.
- [50] Stehfest E, Van Vuuren D, Kram T, Bouwman L, Alkemade R, Bakkenes M, Biemans H, Bouwman A, Den Elzen M, Janse J, Lucas P, Van Minnen J, Müller C, Prins A. Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0: Model Description and Policy Applications. The Hague: PBL, 2014: 27-29.
- [51] Van Vuuren D P, Den Elzen M G J, Lucas P L, Eickhout B, Strengers B J, Van Ruijven B, Wonink S, Van Houdt R. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. Climatic Change, 2007, 81(2): 119-159.
- [52] Barnett A, Fargione J, Smith M P. Mapping trade-offs in ecosystem services from reforestation in the Mississippi Alluvial Valley. Bioscience, 2016, 66(3): 223-237.
- [53] Bagstad K J, Villa F, Johnson G W, Voigt B. ARIES-ARTificial Intelligence for Ecosystem Services: a guide to models and data, version 1.0. ARIES report series, 2011, 1.
- [54] Villa F, Bagstad K J, Voigt B, Johnson G W, Portela R, Honzak M, Batker D. A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment. Plos One, 2014, 9(3): e91001.
- [55] Balbi S, Del Prado A, Gallejones P, Geewan C P, Pardo G, Pérez-Miñana E, Manrique R, Hernandez-Santiago C, Villa F. Modeling trade-offs among ecosystem services in agricultural production systems. Environmental Modelling & Software, 2015, 72: 314-326.
- [56] Mulligan M, Guerry A, Arkema K, Bagstad K, Villa F. Capturing and quantifying the flow of ecosystem services// Silvestri S, Kershaw F, eds. Framing the Flow: Innovative Approaches to Understand, Protect and Value Ecosystem Services Across Linked Habitats. Cambridge, UK: UNEP World Conservation Monitoring Centre, 2010: 26-33.
- [57] Jackson B, Pagella T, Sinclair F, Orellana B, Henshaw A, Reynolds B, McIntyre N, Wheeler H, Eycott A. Polyscape: a GIS mapping framework providing efficient and spatially explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services. Landscape and Urban Planning, 2013, 112: 74-88.
- [58] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S, Willemsen L, Petz K, Palomo I, Drakou E G, Martín-Lopez B, McPhearson T, Boyanova K, Alkemade R, Egoh B, Dunbar M B, Maes J. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. Ecosystem Services, 2013, 4: 4-14.
- [59] 张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展. 生态学报, 2014, 34(2): 316-325.