

DOI: 10.5846/stxb201909282036

范玉龙, 胡楠, 丁圣彦. 生态系统服务网及其生态学意义. 生态学报, 2020, 40(19): 6729-6737.

Fan Y L., Hu N., Ding S Y. Ecosystem service network and its ecology significance. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6729-6737.

生态系统服务网及其生态学意义

范玉龙^{1,*}, 胡楠¹, 丁圣彦²

¹ 南阳理工学院, 南阳 473004

² 河南大学环境与规划学院, 开封 475004

摘要: 生态系统服务概念的提出将人类福祉与生态环境更直接地联系起来, 有助于认识 and 解决发展与保护的难题。从生态系统服务网络的视角出发, 可以更好的理解生态系统服务供给、流动和需求等相关复杂问题。(1) 生态系统服务网将不同生态过程与服务有机联系起来, 为生态系统服务交互研究提供参考。(2) 不同尺度下生态系统服务间的交互作用以及自然-社会的互动是网络体系的重要组成部分, 按服务网络间联系方式可以划分为网状层次、关系模块和对象模块。(3) 生态系统服务在生物、生境网络中形成, 受自然因素和人为因素的双重影响, 服务网络间的联系与转化受生态系统服务流和网络关系的制约。(4) 景观异质性、生物多样性和生态循环分别是生态系统服务网络形成的基础、核心和形成机制。(5) 生态系统服务网络便于生态系统服务价值评估、空间制图, 是提高人类对环境认知的重要手段。(6) 人类福祉与生态系统服务间的非线性关系适宜用网络来表达, 景观优化实质上是生态系统服务网调控的动态过程。

关键词: 生态系统服务网络; 生态系统服务; 生态循环; 生物多样性

Ecosystem service network and its ecology significance

FAN Yulong^{1,*}, HU Nan¹, DING Shenyan²

¹ Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China

² The College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: The concept of ecosystem services (ES) is more directly related to human welfare and ecological environment, which helps to understand and solve the problems of development and protection. From the network perspective, ES related issues such as supply, flow and demand could be understood much better. Firstly, ecosystem service network (ESN) links different ecological processes and services, providing reference for the study of ecosystem services interaction. Secondly, different scales of interaction between ES and interaction between nature and society play an important part of the network system. The network is divided into different layers according to the differences of the function and nature. Thirdly, ES from life and habitat are formed in the network, which are affected by both natural and human factors, the relationship between service network and the transformation of the restriction of the ecosystem service flow (ESF) and network structure. Fourthly, biodiversity and ecosystem circulation of landscape heterogeneity are the core of ESN forms. Fifthly, ESN could facilitate ES value assessment, space mapping, and also could improve the important means of human's cognition to the environment. Human welfare and the nonlinear relationship between ES can be expressed by the network. Landscape optimization is essential for the perfection of ES, and also helps them for their stability in a dynamic process.

Key Words: ecosystem services network; ecosystem services; ecological cycle; biodiversity

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771202); 河南省教育厅项目(20B180007)资助

收稿日期: 2019-09-28; **网络出版日期:** 2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: elonv@aliyun.com

生态系统服务(Ecosystem Services, ES)是指人类直接或间接从生态系统中得到的产品和服务^[1],是人类生存和发展的基础^[2-3]。生态系统服务将人类福祉与环境紧密的联系在一起,是生态学、地理学和环境科学等学科的前沿和热点^[4-6]。分类是生态系统服务的基础,Daily 等将生态系统服务分为 13 种类型^[7];联合国千年生态系统评估(MA)计划把生态系统服务分为供给、调节、文化和支持服务 4 类^[8];Posthumus 等提出了基于生态系统过程和功能生态系统服务分类体系^[9];谢高地等对生态系统服务供给能力进行了划分^[10]。生态系统服务价值评估、空间分布等方面已经取得了丰硕的成果,但在服务形成机制方面研究较少。这些研究较为散乱,缺乏统一的标准,许多问题尚不清楚,研究难以深入。

生态系统服务是生态系统基于人类需求的一种表现形式,其背后的关系网络是问题的实质。生态系统服务是生态系统在生态过程中产生的可用性,这种可用性只是复杂网络相互关系的一部分,并不是仅仅为了人类的需求。人类为使这种可用性更加直接和可控,将系统的某些构成强化或弱化,但这种行动往往是粗糙的,对系统网络造成超乎预期的改变。因此,集成生态系统服务相关研究^[11],全面认识服务背后的复杂系统可以从生态系统服务网着手。不同类型生态系统服务之间总是相互交织在一起^[12-13],生态系统服务网络(Ecosystem Services Network, ESN)是指各种生态系统服务及其驱动力间交互关系的集合。各类服务间的关系往往是非线性的^[14-15],ESN 可用来理解生态系统服务之间以及驱动力之间的联系机制^[16],从生态系统到区域景观,再到自然—社会的复合系统,ESN 的综合性、整体性和应用性特征为认识生态系统提供了一种范式或视角,将来有望发展为拥有独特的本体论、认识论和方法论。ESN 的直接动力来源于自然界生物地球化学循环,通过生态系统结构-过程-功能这一途径来实现。ESN 研究的重点不仅是景观或群落结构,还包括生境与生命体系间形成的复杂关系,人类需求与生态系统服务供给能力间的矛盾统一。ESN 中包含生境子网络、生物子网络、物质循环子网络、社会经济子网络等,各种子网络互相联系、相互影响(图 1)。

1 生态系统服务网的特征及其属性

1.1 尺度特征

生态学要在不同尺度进行研究,ESN 及其组分关系也有相应的尺度依赖特征^[17](图 2),生物的迁移、生态过程都会在一定尺度上发生。如,生态系统服务提供者(源),可以是植物、种群、群落,消费者(汇)可以是区域、流域、城市、国家等。ESN 的影响范围也会呈现出微观到宏观的尺度特征。在时间尺度上,不同的组分对时间的响应也不同,但无论在什么样的时间尺度上,ESN 都有明显的螺旋演化特征,这也是生态适应、进化的重要组成部分。所以,在 ESN 优化时,要充分考虑到生态系统服务的时空尺度特征^[18]。

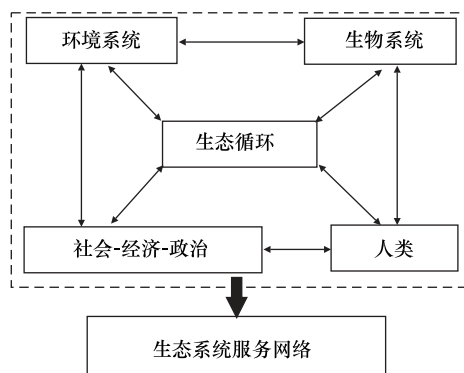


图 1 生态系统服务网络结构

Fig.1 The integral structure of ESN

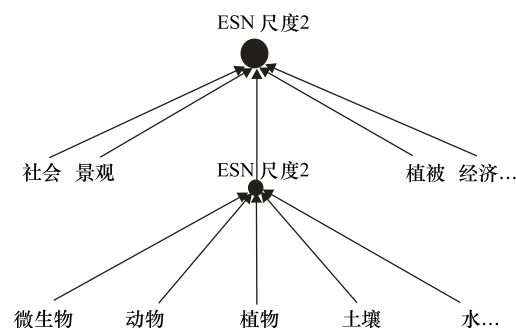


图 2 生态系统服务网络尺度特征

Fig.2 The scale features of the ESN

ESN, ecosystem service network, 生态系统服务网络

1.2 整体属性

生态学研究从二元关系链转向多维关系网,通过社会-经济-自然的生态整合,可以系统地解决全球生态

安全问题^[19]。ESN 中的各个组分及其组合是一个有机整体,每个组分都是网络中的一部分,系统网络是整体的因变量。ESN 具有层次性、时空动态性、网络与流的协同演化等特性^[20]。网络关系造就了不同的组分,而不仅仅是组分影响网络。如物种的分布与迁移是自然选择的结果,包括它自身属性,都是网络在起决定性作用。同时,网络中任何一个组分的改变都会通过网络向外传播,并产生相应的反馈,如果条件合适,很小一个改变将会带来巨大的整体效应,如蝴蝶效应。

1.3 层级结构

ESN 等级结构是指不同组分在整个网络中由于功能和性质而分化为不同等级、层次的现象(图 3),片层的数量、密度和异质性是度量 ESN 的 3 个重要变量。这种分化可以分为水平分化和垂直分化两种类型。水平分化是指同类服务分化与扩张,垂直分化是指不同服务类型上的分化。网络分层是 ESN 的基本构架,网络中物质循环不可能在一个过程中完成,多个不可逆过程或循环过程将是 ESN 的结构方式之一。可以依据组分所处的位置、发挥的作用、关系的强弱进行分层分类。如可以通过相关分析和聚类分析进行分层分类^[21]。如,森林生态系统的植物分层、水体中动物的分层、土壤中动物的分层等。不同组分在 ESN 中所处的片层位置会影响该类服务的影响范围和整体效应。按影响范围可以把 ESN 分为核心区、边缘区和影响区等,也可以按研究对象分为个体、局域和整体等。总之,ESN 的分层分类可以根据需要采用不同的研究方法。

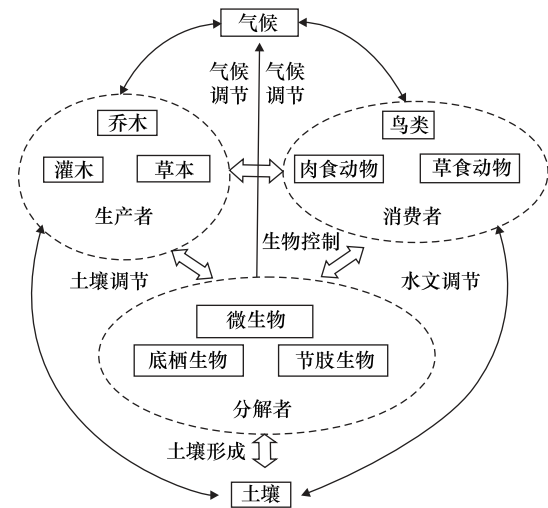


图 3 生态系统服务网络成层与分类

Fig.3 Stratification and classification in the ESN

2 生态系统服务网的关系结构

由于人类需求增长、社会内部竞争和有限自然资源,任何一种生态系统服务并不是孤立存在的,它们之间存在着非常紧密的依赖关系,从而会形成一定的生态系统服务网络结构。位置差异使组分对整体生态系统服务的贡献不同,这些组分可以看成是网络节点,它们对生态系统服务流有通道作用或阻挡作用,如城市、乡村和自然保护区对 ESN 有不同的意义。主要 ES 类型控制着区域资源。如在粮食主产区,人们为了提高产品而大量投入,供给服务会处于主导地位,是区域 ESN 的核心。

网络结构会影响个体或集团的发展,为其提供机会或限制。网络类型、网络密度和联系强度是量化网络结构的重要指标。按网络间联系的方式可以分为三类结构(图 4)。1)同轴结构:为优势 ES 为主导,其他 ES 为外延,这种结构往往存在服务的权衡或协同。2)扇形结构:“源”、“汇”间从直接到间接的扩散结构。3)多核心结构:在一定区域,往往有不同优势共存的 ES,这种结构是 ESN 网优化的目标之一。关系的属性可以根据研究对象和研究内容分为:距离关系、邻近关系、源汇关系、协同关系、权衡关系和多关系共存。按研究尺度可以分为:不同服务类型间的关系、不同服务模块间的关系,不同服务集团间的关系。服务模块与服务集团间存在一定的隶属关系。ESN 间的互相关系可以建立耦合评价模型。如,在一定空间范围内的人类聚居区内,通过物质、能量和信息的流动与交换,将生产、生活与资源环境以 ESN 为中心联系起来^[22],ESN 是社会-经济-自然三个子系统相互作用与联系的纽带。

3 生态系统服务网的形成机制

3.1 景观异质性

景观异质性使区域内存在多种不同的生态过程^[23],是社会结构、文明与经济变迁的内在重要因素,也是

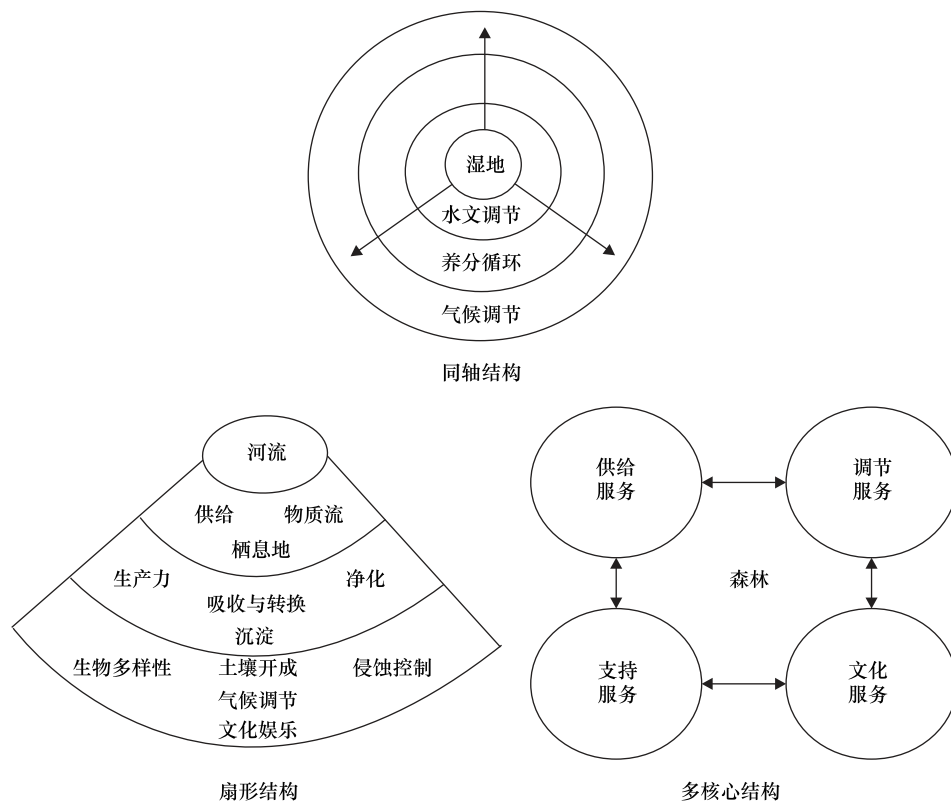


图4 生态系统服务网络关系结构

Fig.4 The relationship structure of the ESN

ESN“源”、“汇”及服务流的直接驱动力^[24](图5)。不同的景观类型产生不同的生态系统服务,地理要素的非均质性是 ESN 多样性的基础^[25]。ES 供需间的权重要考虑到景观异质性^[26-27]。将 ESN 与景观生态学中的斑块-基质-廊道理论相结合也将是研究生态过程的一个方向。景观斑块可以看作是 ESN 中的“源”、“汇”,景观基质是 ESN 的介质和背景,景观廊道是 ESN 的通道或阻隔。另一方面,人类需求与供给间的矛盾是造成景观变化的重要外在驱动力,ESN 正在改变景观结构。合理的景观结构有助于 ESN 功能发挥,景观优化实际上是服务的空间结构调整。土地利用/土地覆被 (LUCC, land use and land cover change) 是影响 ESN 权衡及优化的最重要因素^[28-29]。

可以从以下几个方面来具体探讨景观与 ESN 的关系:1) 以 ESN 来理解物流(包括有机体的迁移)、能流和信息流在景观镶嵌体中的动态机制;2) ESN 受社会经济发展影响大,它的协同与权衡是影响土地利用和覆盖变化的主要驱动力;3) 用 ESN 来研究景观复杂系统。4) ESN 中的网络体系概念可以应用到景观尺度推绎中;5) ESN 可以理解空间自相关性等问题;6) 景观格局指数在 ESN 中的应用与融合;7) 人类活动与 ESN 的交互;8) 景观优化是 ESN 的协同。

3.2 生物多样性

生物多样性通过在生态系统属性和过程中所起的作用与 ESN 产生密切联系^[30-32],生物多样性是 ESN 存

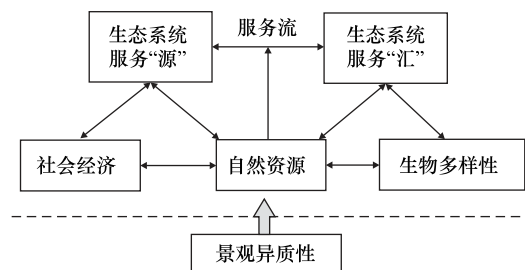


图5 景观异质性对生态系统服务的影响

Fig.5 The influence of landscape heterogeneity on ESN

在的核心与驱动力^[33],是界定 ESN 质量和稳定性的重要指标。生物多样性越高,生态系统功能性状的范围越广,生态系统服务质量就越高、越稳定^[34](图 6)。生物多样性使生态系统功能分化成为可能。包括水平和垂直分化两种:水平分化是同一营养级的多样化,垂直分化是循环过程的分化,如营养链条横向与纵向的拉伸。生物多样性引发了植物与植物、动物与动物、植物与动物间的竞争与适应,竞争是 ESN 稳定与高效的原因。

3.3 生态循环

ESN 的形成是各种循环交织的结果,包括水循环、养分循环、生物地球化学循环和能量流动等过程^[34],以及人类活动对这些循环的影响(图 7)。循环使地球表面的生命系统、社会经济系统具有了活力,保护地球、保护海洋以及保护水资源等等实际上就是保护各种生态循环。可以通过分析物质和能量流动等多重生态过程来认识生态系统服务网^[35]。特别是一些主要的生态循环过程往往对其他过程产生决定性影响,如水循环、养分循环等。生态系统服务网以自然、经济和社会为主要驱动力构建而成。自然网包括生态链、食物网等。经济网包括农业-工业生产等需求^[36],社会网包括人际关系为线和人类认识、需求等。各种循环网络是 ESN 形成的基础,但是人类活动已经强烈改变了这种循环^[37-39]。

ESN 形成过程主要是物理、化学循环和生物学循环 3 个过程。如水循环和 C、N 循环等。这种循环具有以下特征:1)循环是所有服务稳定共存的基础,它们相互影响,并与不属于此循环的单元竞争。2)循环可以在不同尺度进行,只要这种改变具有选择优势。3)循环一旦形成便具有一定的弹性和恢复力。ESN 的逐步发展过程需要网络循环的组织形式,它既稳定又允许变异。ESN 循环结构需要依靠外界的能量和物质流来维持,在不断发展过程中会产生结构性的变异。ESN 扩张的方式有通道扩张、近邻扩张和等级扩张等几种形式。ESN 有相对的边界和结构,即 ESN 的尺度依赖特征。从低层次和微循环到景观尺度的大循环间存在区分和联系,小循环是大循环的一部分,大循环又会影响小循环的进行(图 8)。可以通过不同尺度的关联来分析 ESN 的形成机制,如植物功能群就是物种间存在的一种功能组合^[40],可以理解为一个生态系统服务模块。多功能景观是在区域尺度上多种功能组合。ESN 中包含各种不同层次的边界和结构,这也正是生态系统服务的区域特色,它们存在于具体生态组分之间的关系模式规则中。

3.4 生态系统服务流

生态系统服务网的联系主要靠各种生态系统服务流来实现。生态系统服务流(Ecosystem service flow, ESF)是指网络中各节点单元间物质、能量和信息的流入、吸收和流出,以及与外部系统间的交换和转化。它是 ESN 联系的通道,也是 ESN 动态变化的直接原因。生态过程和社会经济过程通过 ESF 联系起来^[41]。生态系统服务往往经过传递才能实现其价值,其价值高低与使用者的情况密切相关。ESF 流是 ESN 健康程度的

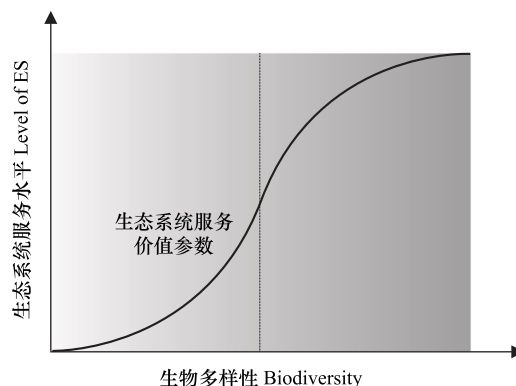


图 6 生物多样性与生态系统服务^[34]

Fig.6 Biodiversity and ES

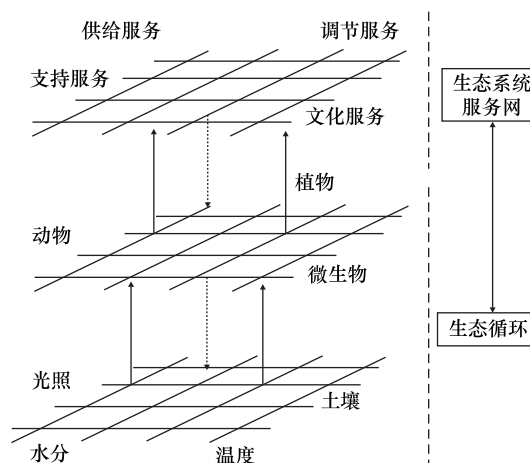


图 7 生态系统服务网与生态循环

Fig.7 Ecosystem services network and ecological cycle

最重要标志。源汇间的压力符合系统动力学与 ESN 因果反馈机制。

地理、生命、经济、文化、政治和技术等过程会使 ESN 发生空间移动。ES 在不同区域、产业、消费环节产生运动、转移和转化。如在价值势的作用下,发生的在原态、加工、消费和废弃运动过程中 ES 类型、功能与价值的转移过程。ES 流向、流速、流量和频率主要由价值差、资源分布不均衡、以及提供和消费不对等决定的。供给区、消费区和连接区的距离和耗费会影响 ESF,引发 ESF 的成本效应,包括构建成本、浪费本成、源汇不对等成本、其他因素成本等。在某种服务被显式利用和转化的过程中,还可能间接地使用到另一种服务,如水

资源参与了多种服务的流动。然而值得注意的是,ESF 是一个自然过程,ES 在流动过程中即使没有被消费,同样会流动。其他影响 ESF 的因素:1)生物的集结与分散。一些区域干扰的减少或加重,都会带来集结或分散。物种的迁移、传播和人类的选择偏好都会影响 ESF,如天然林禁伐后,森林的供给服务转变为支持、调节服务为主。2)资源的分布差异、服务需求差异和社会分工。3)干扰的阻断与分割。4)入侵,生物入侵会改变系统的结构。5)循环,无论是大尺度还是小尺度,均存在不同的循环体系。

4 社会经济发展与人类福祉

4.1 社会经济与生态系统服务网

ESN 是社会经济发展的基础。同时,社会经济发展对 ESN 产生巨大的影响,已经内化为 ESN 的重要驱动力。可以从 4 个方面来理解:1)社会政治、经济制度作为最重要的人类活动构架,会对 ESN 造成主动影响。一般来说,自然景观的 ESN 最为合理,人们为了获取更加直接有效的服务,往往对 ESN 进行改造,使其位置、结构和功能都以人类意志发生偏移,但这种转移要建立在自然 ESN 的承受能力和转变速率的基础上。2)ESN 的公共属性造成了它与社会的紧密联系。3)服务的双向性。服务的供给、对象的需求和两者的博弈,供给和消费不可能完全对等,不同发展阶段和层次的使用者也会对服务产生不同的反馈。4)ESN 的全局性。任何生态系统服务都是全球 ESN 的一部分。任何区域的社会经济都会得到 ESN 的惠益或对其产生影响。如有些地方 ESN 并不健全,社会经济却十分发达。社会经济结构的调整和生活方式的转变都会对 ESN 带来影响,特别是一些重大的工程,往往对区域 ESN 的整体带来结构性的改变,如大坝、城镇化和跨区域调水等。

4.2 人类福祉与生态系统服务网

把 ESN 与资源利用、生态系统管理、生物多样性保护、区域可持续发展、生态安全以及减少贫困等人类福祉结合是 ESN 应用的重点^[42-45]。如,贫困与 ESN 间关系密切,因为贫困人口更依赖于生态系统服务^[46-47]。可以将自然资源和 ESN 建设相结合来确定区域发展战略^[48]。保护和维持生态系统服务能力不仅是一项福利,也是物质文明和精神文明建设的基础。人类不断增长的需求与有限的生态系统服务能力间的矛盾要靠人类对生态系统认知来解决。ESN 可以更直接的展现人与生态系统间的关系,能帮助提高公众对生态保护的意识^[6]。同时,提高文化认知是构建良好 ESN 的有效手段。文明也是人类进步的标志,具有对生态系统服务网最稳定、最长期、最深远的约束力和影响力。如权力、资源分配、性别、信息技术等文明是人类社会特有的,会对 ESN 做出主动影响。

5 生态系统服务网与景观优化

景观优化是不同尺度下系统结构与功能的优化,是在人类需求下尽可能的维持系统的高效循环,保证

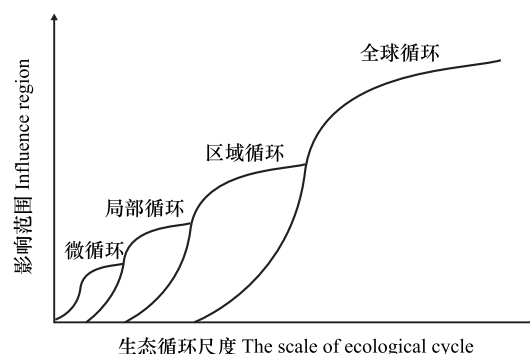


图 8 不同生态循环尺度间的关系

Fig.8 The relationship among cycles at different scales

ESN 结构的完整和功能的完善。除部分人类活动有利于生态系统服务功能的稳定与提高外,更多地导致危及自身生存与发展的生态环境危机与灾难^[49]。所以,景观优化必须科学地与 ESN 相结合,将人类发展与 ESN 依存当作生态系统管理的导向^[50],把 ESN 的健康状况当作可持续发展的表征^[51]。把生态红线和基础设施建设作为保持、改善和增加生态系统服务的条件^[52-53]。

ESN 与社会经济发展都有显著的空间和时间特色,在景观优化时,必须考虑当地的实际状况,考虑生态系统服务在空间和时间尺度的权衡^[54]。景观优化不是一步完成的,包括结构优化—效率优化—使用优化—文化优化等几个过程,实际上是生态效率不断提高、人地和谐共处的动态交互过程。包括以下 3 个方面(图 9):1) 优化景观结构和系统结构,使 ESN 各个服务模块更加多样、合理,服务网络完整且密度高;2) 提高生产力水平,加快物质循环,提高环境的承受、转化能力;3) 提高生态系统管理水平和大众参与度,重视人类社会发展和生活方式对 ESN 的主动影响。特别是重大决策与 ESN 构建有机结合,如乡村振兴、一带一路、南水北调、大坝、高速公路和铁路重大工程要充分考虑 ESN 的承受能力,也要考虑不同区域的 ESN 差异,如农村与城市的差异,黄河流域、西北干旱区和东南沿海快速发展区的差异。

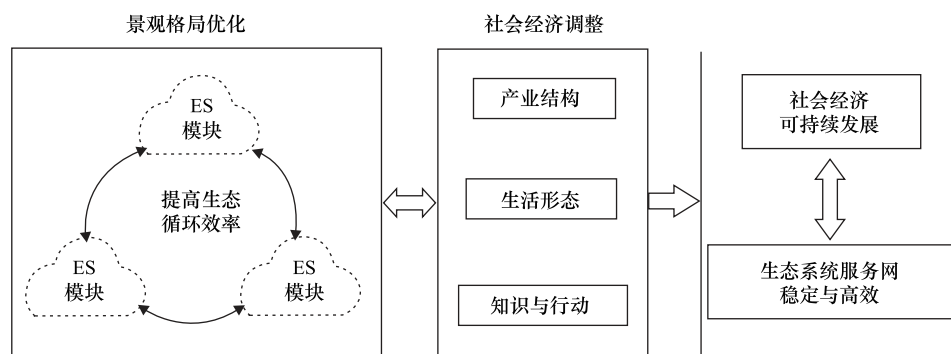


图 9 生态系统服务网与景观优化过程

Fig.9 The optimization process of landscape and ESN

大多生态学理论和方法的实际应用面临困境:见效慢、机理复杂、干扰因素多、投资大、受益不明确、需要多方配合等等,并且不十分符合特定区域社会发展现状。生态保护和恢复往往需要政府的强烈干预,但不易在短期见成效,政绩不易突出,推进困难。ESN 的应用将成为解决生态安全方面的有效手段和理论依据,且容易辨识。未来可以将智慧地球与 ESN 有效结合,利用 3S 技术在全球范围实现 ESN 与人居环境及可持续发展的定量化,使生态补偿等保护手段真正有据可循。

6 展望

人类发展占用大量的生态空间,生态系统服务能力下降,人类在服务网络中得到的保障也越来越弱,最终会使损害人类自身利益。生态系统服务网络提供了一个新的研究视角,它把生态系统服务的产生、流动、需求和消费看成是一个有机整体。生态系统服务网的形成机制是各种生态过程和社会发展在不同尺度上作用的结果,具有明显的动态特征。景观异质性、生物多样性和生态循环是生态系统服务网络关系形成的内在动力,社会经济发展是其外在的需求压力,在两者的推动下产生的生态系统服务流赋予整个网络生命力。一些主要的生态循环过程往往对整个网络产生决定性影响。人类福祉与生态系统管理是生态系统服务网优化的一个组成部分,可以通过生态系统服务网络评价来进行精准生态建设^[55],实现在不同尺度上的稳定与高效。最终目标是有效的捕获能量和利用资源,使地球资源能在这个网络体系中高效循环。

生态系统服务由生境、生命、社会、经济、政治和文化几个层面决定,可以从网络视角对这种复杂问题进行探讨,将 ESN 中的节点、关系和对象作为研究的切入点。ESN 也为生态系统服务制图提供一个新思路^[56-57]。ESN 中的循环与反馈总是处于螺旋进化过程中,某一循环单的终点是一个新阶段的开始。ESN 研究数据来

源涉及到生态研究的各个方面。包括个体属性数据(生物学特征等)和关系数据(营养级、食物链、景观连接度、信息传递、景观结构、需求与供给等联系数据)。如果把生态系统服务网络看成是维持人类生存和发展保护网,那么现在网络中“破洞”、“断线”、“抽丝”、“扭曲”、“单薄”等问题突出,网络中的“节点”、“链环”、“服务点”、“服务线”、“服务面”、“服务团”、“服务核心”等也应该是关注的重点。现实中的水循环网络、河道流域网络等也值得用生态系统服务网络去研究。

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] 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.
- [3] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. *生态学报*, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [4] 巩杰, 徐彩仙, 燕玲玲, 郭青海. 1997—2018 年生态系统服务研究热点变化与动向. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3265-3276.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [8] 赵士洞, 张永民. 生态系统评估的概念、内涵及挑战——介绍《生态系统与人类福利: 评估框架》. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 650-657.
- [9] Posthumus H, Rouquette J R, Morris J, Gowing D J G, Hess T M. A framework for the assessment of ecosystem goods and services; a case study on lowland floodplains in England. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1510-1523.
- [10] 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.
- [11] 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): 7159-7167.
- [12] Heal G M, Daily G, Ehrlich P, Salzman J E, Boggs C, Hellman J, Hughes J, Kremen C, Ricketts T. Protecting natural capital through ecosystem service districts. *Stanford Environmental Law Journal*, 2001, 20(2): 333-364.
- [13] Capistrano D, Samper C, Lee M J, Raudsepp-Hearne C. *Ecosystems and Human Well-Being: Multiscale Assessments: Findings of the Sub-Global Assessments Working Group of the Millenium Ecosystem Assessment*. Washington: Island Press, 2005.
- [14] Farber S C, Costanza R, Wilson M A. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 375-392.
- [15] van Jaarsveld A S, Biggs R, Scholes R J, Bohensky E, Reyers B, Lynam T, Musvoto C, Fabricius C. 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.
- [16] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [17] Kremen C. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, 2005, 8(5): 468-479.
- [18] Gabriel D, Sait S M, Hodgson J A, Schmutz U, Kunin W E, Benton T G. Scale matters: the impact of organic farming on biodiversity at different spatial scales. *Ecology Letters*, 2010, 13(7): 858-869.
- [19] 王如松. 生态整合与文明发展. *生态学报*, 2013, 33(1): 1-11.
- [20] 赵庆建, 温作民, 张华明, 王磊. 复杂生态系统网络: 生态与社会经济过程集成研究的新视角. *生态经济*, 2011, (11): 30-33.
- [21] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [22] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [23] 孙然好, 李卓, 陈利顶. 中国生态区划研究进展: 从格局、功能到服务. *生态学报*, 2018, 38(15): 5271-5278.
- [24] 刘绿怡, 卞子元, 丁圣彦. 景观空间异质性对生态系统服务形成与供给的影响. *生态学报*, 2018, 38(18): 6412-6421.
- [25] 宋博, 丁圣彦, 赵爽, 李子晗, 侯笑云. 农业景观异质性对生物多样性及其生态系统服务的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(4): 443-450.
- [26] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例. *生态学报*, 2019, 39(19): 7067-7078.
- [27] Swallow B M, Sang J K, Nyabenge M, Bundotich D K, Duraipappah A K, Yatich T B. Tradeoffs, synergies and traps among ecosystem services in the Lake Victoria basin of East Africa. *Environmental Science & Policy*, 2009, 12(4): 504-519.
- [28] Haines-Young R. Land use and biodiversity relationships. *Land Use Policy*, 2009, 26 Suppl 1: S178-S186.
- [29] Cowling R M, Egoh B, Knight A T, O'Farrell P J, Reyers B, Rouget M, Roux D J, Welz A, Wilhelm-Rechman A. An operational model for mainstreaming ecosystem services for implementation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9483-9488.
- [30] 李奇, 朱建华, 肖文发. 生物多样性与生态系统服务——关系、权衡与管理. *生态学报*, 2019, 39(8): 2655-2666.

- [31] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 2001, 294(5543): 804-808.
- [32] Hollowell V C. *Managing Human-Dominated Ecosystems*. Saint Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2001.
- [33] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1146-1156.
- [34] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦, 梁国付, 卢训令. 陆地生态系统服务与生物多样性研究进展. *生态学报*, 2016, 36(15): 4583-4593.
- [35] de Bello F, Lavorel S, Díaz S, Harrington R, Cornelissen J H C, Bardgett R D, Berg M P, Cipriotti P, Feld C K, Hering D, da Silva P M, Potts S G, Sandin L, Sousa J P, Storkey J, Wardle D A, Harrison P A. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(10): 2873-2893.
- [36] Andersson E, Barthel S, Ahn K. Measuring social-ecological dynamics behind the generation of ecosystem services. *Ecological Applications*, 2007, 17(5): 1267-1278.
- [37] Seitzinger S P, Kroeze C. Global distribution of nitrous oxide production and N inputs in freshwater and coastal marine ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(1): 93-113.
- [38] Tilman D, Fargione J, Wolff B, D'Antonio C, Dobson A, Howarth R, Schindler D, Schlesinger W H, Simberloff D, Swackhamer D. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 2001, 292(5515): 281-284.
- [39] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737-750.
- [40] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦, 翟元杰, 柳静, 廖秉华, 卢训令. 伏牛山自然保护区森林生态系统草本植物功能群的分类. *生态学报*, 2008, 28(7): 3092-3101.
- [41] 王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展. *生态学报*, 2019, 39(12): 4213-4222.
- [42] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. *生态学报*, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [43] 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.
- [44] 杨莉, 甄霖, 李芬, 魏云洁, 姜鲁光, 曹晓昌, 龙鑫. 黄土高原生态系统服务变化对人类福祉的影响初探. *资源科学*, 2010, 32(5): 849-855.
- [45] 郑伟, 石洪华. 海洋生态系统服务的形成及其对人类福利的贡献. *生态经济*, 2009, (8): 178-180.
- [46] Tschakert P. Environmental services and poverty reduction: options for smallholders in the Sahel. *Agricultural Systems*, 2007, 94(1): 75-86.
- [47] Comim F, Kumar P, Sirven N. Poverty and environment links: an illustration from Africa. *Journal of International Development*, 2009, 21(3): 447-469.
- [48] Bryan B A, Grandgirard A, Ward J R. Quantifying and exploring strategic regional priorities for managing natural capital and ecosystem services given multiple stakeholder perspectives. *Ecosystems*, 2010, 13(4): 539-555.
- [49] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. *自然资源学报*, 2003, 1(1): 118-126.
- [50] Chapin III F S, Carpenter S R, Kofinas G P, Folke C, Abel N, Clark W C, Olsson P, Smith M S, Walker B, Young O R, Berkes F, Biggs R, Grove J M, Naylor R L, Pinkerton E, Steffen W, Swanson F J. Ecosystem stewardship: sustainability strategies for a rapidly changing planet. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(4): 241-249.
- [51] Maler K G, Aniyar S, Jansson Å. Accounting for ecosystem services as a way to understand the requirements for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9501-9506.
- [52] 江波, 王晓媛, 杨梦斐, 蔡金洲. 生态系统服务研究在生态红线政策保护成效评估中的应用. *生态学报*, 2019, 39(9): 3365-3371.
- [53] 韩林桅, 张森, 石龙宇. 生态基础设施的定义、内涵及其服务能力研究进展. *生态学报*, 2019, 39(19): 7311-7321.
- [54] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, Cumming G S, Cork S, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28.
- [55] 李潇, 吴克宁, 刘亚男, 冯喆, 谢家麟. 基于生态系统服务的山水林田湖草生态保护修复研究——以南太行地区鹤山区为例. *生态学报*, 2019, 39(23): 8806-8816.
- [56] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, Fisher B, Green R E, Lehner B, Malcolm T R, Ricketts T H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9495-9500.
- [57] Egoh B, Reyers B, Rouget M, Bode M, Richardson D M. Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in South Africa. *Biological Conservation*, 2009, 142(3): 553-562.