

## 陆地生态系统服务若干特征与管理应用

耿念姿<sup>1,2</sup>, 郑 华<sup>1,2</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. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 陆地生态系统为人类的生存发展提供了物质产品及生存环境 2 方面的多种服务, 认识生态系统服务的基本特征是生态系统管理的重要前提。基于陆地生态系统服务的产生、传输与利用等过程, 生态系统服务的基本特征可以概括为: 质量依赖性、空间异质性、空间尺度关联性、权衡与协同和多尺度传输等方面。认识生态系统服务特征可以为生态系统管理提供重要启示: 提高生态系统质量; 辨识和保护高保护价值区域; 维护生态系统服务过程的完整性; 协调生态系统服务权衡关系; 权衡多尺度利益相关者。关于陆地生态系统服务基本特征及管理应用的综述, 可为有效管理生态系统、提升生态系统服务提供科学指导。

**关键词:** 生态系统服务; 生态系统管理; 权衡; 尺度; 可持续发展

**中图分类号:** X171

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022030029

## Characteristics of terrestrial ecosystem services and applications for ecosystem management

GENG Nianzi<sup>1,2</sup>, ZHENG Hua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Terrestrial ecosystem provides a variety of services in both material products and living environment for human survival and development, understanding the characteristics of ecosystem services is an important prerequisite for ecosystem management. According to the generation, delivery and use of ecosystem services, the characteristics of ecosystem services include ecosystem quality dependence, spatial heterogeneity, multi-scale correlation, trade-offs and synergies and cross-scale delivery. Understanding these characteristics can provide important implications for ecosystem management, including improving ecosystem quality, identifying and protecting high conservation value areas, maintaining the integrity of ecosystem service process, coordinating ecosystem service trade-offs and weighing multi-scale stakeholders. The review on the characteristics and management application of terrestrial ecosystem services can provide a scientific guidance for effective ecosystem management and improving ecosystem services.

**Keywords:** ecosystem services; ecosystem management; trade-offs; scale; sustainable development

**CLC number:** X171

生态系统服务是人类从生态系统中获得的惠益, 既包括食物、纤维等物质产品, 也包括维持人类生存和发展所需的各种环境条件与效用<sup>[1-2]</sup>。然而, 随着人口增长与经济发展, 全球生态系统服务出现了丧失与退化, 对人类福祉及可持续发展造成威胁, 其中主要原因之一是缺乏有效的生态系统管理<sup>[3]</sup>。阐明生态系统服务特征是科学管理生态系统的基础,

可为提升生态系统服务及人类福祉提供理论支持。

1997年, COSTANZA et al<sup>[1]</sup>核算了全球生态系统服务的价值, 随后生态系统服务研究受到国内外学者的广泛关注。自联合国启动千年生态系统评估计划以来, 生态系统服务的概念、分类体系及研究方法得以完善<sup>[2]</sup>, 为研究的深入奠定了基础。此后, 国内外学者围绕生态系统服务的特征展开了

收稿日期: 2022-03-10

录用日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41925005; 41871217)

作者简介: 耿念姿(1997-), 女, 硕士研究生。研究方向: 生态系统过程与服务。E-mail: Nancy199705@163.com

通信作者: 郑华(1974-), 男, 研究员。研究方向: 生态系统过程与服务。E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

引用格式: 耿念姿, 郑 华. 陆地生态系统服务若干特征与管理应用[J]. 环境保护科学, 2023, 49(x): 1-10.

大量的研究,内容涉及生态系统服务的形成机理、权衡/协同关系、尺度特征和流动等多方面<sup>[4]</sup>。近年来,面向生态系统服务的生态系统管理成为研究重点,如何将生态系统服务的理论认知应用于管理实践,是目前研究中的关键议题<sup>[5]</sup>。生态系统管理的核心目的之一是提升生态系统服务以满足不同利益相关者的需求,加强生态系统管理是实现多方协同增益及可持续发展的必要途径<sup>[6]</sup>。陆地生态系统服务的产生、传输和使用等过程由生态系统的结构、过程和功能等属性控制,同时受到人类活动、需求与管理措施等多因素的影响<sup>[7]</sup>,因此,基于生态系统格局、结构、过程的基本特征及其与生态系统服务的关系,系统总结生态系统服务的基本特征,有望为管理和调控生态系统、提高生态系统服务提供科学依据。

本文基于陆地生态系统服务的产生、传输与利用等过程,从自然生态系统与社会经济系统之间的关系出发,系统总结陆地生态系统服务的若干特征,阐述面向生态系统服务提升的生态系统管理策略,其目的:阐释生态系统格局/结构-过程与生态系

统服务的关系,深化认识陆地生态系统服务的基本特征;明确基于生态系统服务提升的陆地生态系统管理途径,以期优化生态系统管理、提升生态系统服务奠定科学基础。

## 1 面向生态系统服务的生态系统管理

生态系统服务依赖于自然生态系统的供给,同时与利益相关者价值取向、偏好及管理活动息息相关,与人类福祉之间存在着复杂而密切的联系<sup>[8]</sup>。一方面,自然生态系统的结构、过程和功能是生态系统服务产生与传递的基础,且生态系统服务在传输过程中存在多种相互作用(包括权衡和协同)<sup>[9]</sup>,影响其对社会系统及人类福祉发挥作用的潜力;另一方面,社会系统对生态系统产生反馈,利益相关者进行的生态系统管理将改变土地利用,进而改变生态系统的组成、结构、过程与功能,并对生态系统服务及其权衡/协同关系产生影响,最终影响人类福祉,见图 1。生态系统服务基本特征的研究可为生态系统管理与科学决策提供理论指导,促进经济社会与自然环境的协同发展<sup>[10]</sup>。

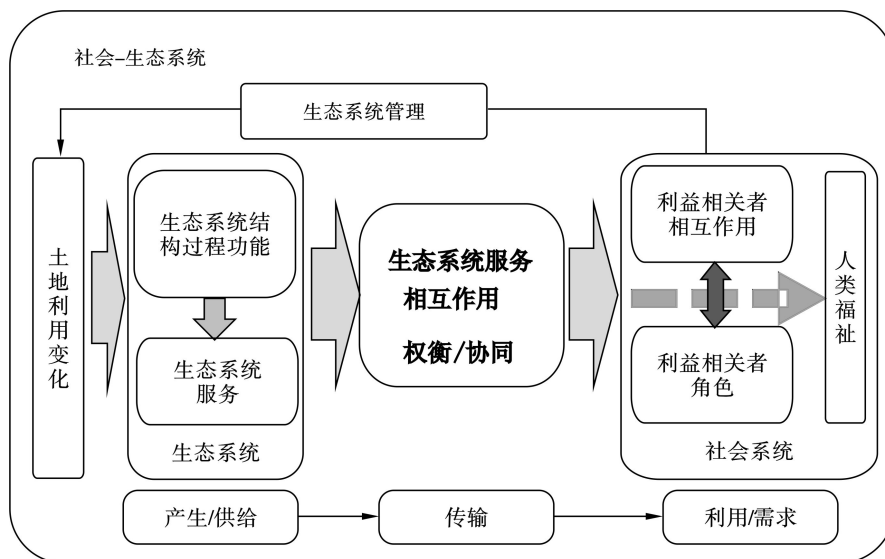


图 1 生态系统服务产生-传输-利用及管理框架 (修改自 FELIPE-LUCIA et al<sup>[7]</sup>)

Fig. 1 Ecosystem Services Generation, Transport, Utilization and Management Framework (modified from Felipe Lucia et al<sup>[7]</sup>)

生态系统管理以生态系统的组成、结构及服务与人类福祉的级联关系为基础,综合利用生态学、社会经济学等多学科基本原理制定策略,其目标是可持续获取优质、多类型的生态系统服务,满足不同利益相关者的需求<sup>[11]</sup>。进行生态系统管理,需明确生态系统服务的基本特征。基于生态系统服务的产生、传输和利用的过程,陆地生态系统服务具

有以下 5 点特征:质量依赖性、空间异质性、空间尺度关联性、权衡与协同和多尺度传输。

## 2 生态系统服务基本特征

### 2.1 生态系统质量依赖性

生态系统质量指一定时空范围内自然生态系

统的优劣程度,是生态系统结构、状态、恢复力和完整性等性质的综合体现<sup>[12]</sup>;从生态系统服务的角度出发,生态系统质量可表示为生态系统为人类提供服务的能力强弱程度<sup>[13]</sup>。生态系统质量多采用指标体系法进行衡量,如湖泊生态系统多以湖泊水面积比、富营养化程度,河流生态系统质量多以断流长度比例为指标;森林、草地等陆地生态系统多用植被覆盖度、叶面积指数、净初级生产力和生物量等指标评估质量。这些与植被相关的参数可以有效反映其茂密程度、生产能力和生长状况等,对生态系统质量及服务的变化起到指示作用。作为自然生态系统的重要组成部分,植被可提供食物、木材和天然药物等产品,影响气候、土壤和水文等生态过程,通过改变土壤养分、含碳量和含水量等性质产生多种调节服务<sup>[14]</sup>,并在影响生态系统结构与功能的基础上产生文化与支持服务<sup>[15]</sup>。

生态系统质量是影响生态系统服务的核心因素之一。物种与功能多样性较高、生态系统质量较好的地区通常是生态系统服务形成与供给的热点区域<sup>[16]</sup>,反之,生态系统的质量恶化与退化常与生态系统服务的衰退相伴发生<sup>[17]</sup>。大量研究表明,生态系统质量改善能够提升生态系统服务。BENAYAS et al<sup>[18]</sup>综合分析各国案例,发现实施生态恢复可增加 25% 的生态系统服务;丁肇慰等<sup>[19]</sup>研究发现 2000~2015 年,长江流域自然生态系统质量有所提高,流域内作物生产能力、洪水调蓄及土壤保持功能也随之呈现上升趋势;卢慧婷等<sup>[20]</sup>分析拉萨河流域生态系统质量变化对生态系统服务的影响,发现 1990~2000 年生态系统质量的改善是土壤保持和固碳服务增长的主要原因;LI et al<sup>[21]</sup>通过定量评估,得出植被覆盖度增长使黄河流域兰州站以上地区的洪水调蓄服务上升了 8.6%。

## 2.2 空间异质性

生态系统服务的种类、数量和重要性在空间上呈现出差异性分布,即空间异质性<sup>[22]</sup>。地形、气候和土壤等自然因素是决定生态系统服务空间异质性的基础。如地形影响温度与湿度、土壤侵蚀速率和植被覆盖等环境因素<sup>[23]</sup>,导致养分利用、水文循环等生态过程不同,生态系统服务的分布规律也不同;气候因素控制降水、温度和物种分布等环境条件<sup>[24]</sup>,直接影响支持服务的空间特征,又通过影响土地及其他资源的利用,间接作用于供给、调节和

文化服务<sup>[25]</sup>;土壤的理化性质不同也会使与之相关的生态系统过程与服务呈现空间分布差异。此外,人类活动及土地利用变化导致的生态系统组成与类型改变,不同利益相关者的需求存在差异<sup>[8,26]</sup>,同样使得生态系统服务呈现出空间异质性。

许多研究者通过量化评估或空间制图刻画并分析生态系统服务的分布规律。一方面,同一种生态系统服务在空间上存在高低值的不同,如, AHMED et al<sup>[27]</sup>发现流域的产水服务受气候、土壤性质和海拔等因素的强烈影响呈现空间异质性;饶恩明和肖焱<sup>[28]</sup>研究得出四川省土壤保持服务高值区主要分布在地形起伏较大的盆周山地区。另一方面,不同类型生态系统服务在空间上也会呈现出分异性。生态系统的组成类型不同,其生态过程、功能不同,主导的生态系统服务种类及其供给存在差异,如农田的供给服务突出,林地的气候调节、水质净化等调节服务突出<sup>[29]</sup>。QIU 和 TURNER<sup>[30]</sup>分析了土地覆盖对水文服务的影响,结果表明淡水资源的供给与湿地、城市的覆盖率呈负相关,而耕地覆盖率较低、湿地面积较大的子流域具有更高的地表水质量;杨冕等<sup>[31]</sup>分析湖北省关键生态系统服务,发现水源涵养服务的形成区域集中在湖泊水体流经地,空气质量调节与休闲娱乐服务的供给区主要为神农架林区及省内山区。

## 2.3 空间尺度关联性

生态系统服务在生态系统尺度、景观尺度和区域尺度存在着密切联系,呈现出空间尺度关联性。例如,咖啡林提供作物产品,周边天然林中的蜜蜂提供授粉服务,通过授粉这一过程,2 种不同的生态系统产生的服务在景观尺度上彼此关联,且天然林的保护能够促进咖啡产量的提高<sup>[32]</sup>。不同尺度上的生态系统关联是其形成与传递机制引起的,受到景观异质性与多种生态过程的控制。景观异质性体现了景观组成单元的类型及其组合与配置在空间上的差异,影响物质、能量、信息的流动及传递,是生态系统服务过程的驱动力<sup>[22]</sup>;生态过程是生态系统中生物组分与非生物要素之间相互作用的结果<sup>[33]</sup>,生物(如授粉昆虫、天敌等)分布、迁移及多样性对授粉、生物控制等服务产生直接影响,也可以通过改变生物地球化学循环、能量流动和养分循环等过程间接影响其他类型的生态系统服务<sup>[34]</sup>。

解析生态系统服务的尺度关联需关注其背后

的生态过程,景观组成与配置、生境比例与覆盖度和植被组成情况均会产生影响<sup>[35-37]</sup>。农田往往比人工林地具有更高地提供授粉服务的能力,其原因是大部分人工林物种组成较为单一,而农田周围常存在沟渠、树篱等半自然生境,传粉昆虫的多样性和丰富度较高,因此更有利于授粉服务的形成与产量的提高<sup>[38]</sup>。MAAS et al<sup>[39]</sup>发现热带自然系统中鸟类和蝙蝠的捕食作用能够降低附近农田的虫害,使粮食增产并为当地农民带来经济效益,且天然森林与农田距离越邻近,食虫鸟类的丰富度及相关生态系统服务的供给能力越高<sup>[40]</sup>; DIEKTER et al<sup>[37]</sup>认为区域中农林交互的管理模式有助于增加植食昆虫的多样性及其对田间杂草的取食能力,从而提高农业生产量。而农业景观简化、森林砍伐及自然栖息地的破坏会影响种间关系及营养级联效应,造成虫害控制服务降低<sup>[41]</sup>,甚至增加疾病传播的风险<sup>[42-44]</sup>。

#### 2.4 权衡与协同

各生态系统服务之间存在着复杂、非线性的相互影响<sup>[45]</sup>,表现为权衡或协同等关系<sup>[9]</sup>。由于某种生态系统服务的使用增加,导致其他服务供给减少的状况,被称为生态系统服务的权衡<sup>[46]</sup>; 2种或多种生态系统服务同时增加或同时减少即为协同<sup>[47]</sup>。权衡关系在供给服务和调节、文化及支持服务之间最为常见,如牧草供给与侵蚀控制<sup>[48]</sup>、肉类供应与固碳服务<sup>[49]</sup>和农业生产与美学价值<sup>[50]</sup>等;协同关系较多存在于调节与支持服务,如水质净化、灾害防护和固碳等之间<sup>[51]</sup>。常见的权衡分类方法有3种:根据时空尺度和权衡的可逆性,可将生态系统服务权衡分为4类,包括空间上的权衡、时间上的权衡、回复性的权衡和服务之间的权衡<sup>[46]</sup>;基于服务间相互作用的情况,又可将权衡分为无相互作用服务、直接权衡、凸型权衡、凹型权衡、非单调凹型权衡和倒“S”型权衡<sup>[52]</sup>;从人类需求出发,可分为供给权衡、供需权衡和需求权衡<sup>[53]</sup>。

土地利用/土地覆被变化通过改变生态系统类型、结构与景观格局影响能量流动、水文过程、生物地球化学循环等生态过程<sup>[2]</sup>,进而影响生态系统服务的关系与相互作用,是生态系统服务权衡与协同的主要驱动力之一<sup>[54]</sup>。耕地扩张与农业发展在为人类提供粮食、纤维等产品的同时,削减了其他生态系统服务。LI et al<sup>[55]</sup>评估张掖市的农业生产

对生态系统服务的影响,发现集约化农业活动带来的产量提高是以降低产水量和土壤保持服务为代价的; GENELETTI et al<sup>[50]</sup>指出大规模农业增产导致了栖息地的丧失和生物多样性下降,也削减了户外休闲等文化服务。城市化进程中,建筑用地大幅扩张,农田和林地、草地等自然生态系统面积急剧缩减,使多种调节、支持服务明显降低<sup>[56]</sup>,同时影响生态系统服务的权衡/协同关系<sup>[57]</sup>,甚至会导致某些权衡的加剧。此外,收割和资源需求、自然资源管理、政策手段、科学和技术进步等也是生态系统服务权衡/协同的常见驱动力<sup>[58]</sup>。

#### 2.5 多尺度传输

生态系统服务通过空气、水和生物等介质进行传输,实现其产生到使用的过程,并通过服务供给区与受益区的时空关联呈现出多尺度传输的特性,涉及多个时空尺度的利益相关者<sup>[59]</sup>。生态系统服务传输的介质也会影响其形成与发挥效用的尺度,如在流域尺度以水流为介质,上游产生的淡水及水质净化服务可为中下游城镇居民提供农业、工业和生活用水;以空气为介质,上风向森林、草地等生态系统提供的防风固沙服务可为下风向居民降低灾害与侵蚀的风险。

人类从不同尺度上都可能获得并使用生态系统服务<sup>[60]</sup>,而不同尺度的利益相关者获取的服务类型、数量、质量与重要性存在差异<sup>[61]</sup>,由此导致了多尺度的权衡。这种权衡受到利益相关者角色与权力关系的影响<sup>[7]</sup>,如农民通常更在意经济效益而忽略潜在的生态系统服务供给能力,政府则是从区域整体的发展出发综合衡量社会与生态效益<sup>[61]</sup>。以湿地生态系统为例,当地居民注重水产品、芦苇等提供服务或将湿地开垦为耕地带来的直接经济收益,区域尺度的居民注重洪水调蓄、水质净化服务提供的环境条件,而生物多样性及生境质量服务则更为国家及全球决策者的关注<sup>[29,46]</sup>。对某一尺度生态系统服务的过度使用,有可能导致其他尺度服务的降低与丧失。全美运河上游美国居民的增长及对水资源的过分消耗,破坏了河流下游墨西哥境内的湿地生态系统,致使维护生物多样性的自然栖息地质量下降<sup>[62]</sup>;牧民追求草原生态系统中短期内的食物供给服务,过度放牧,降低长期的调节服务与支持服务,导致下风向城市沙尘暴天气频发,并且会造成未来经济收益的损失<sup>[63]</sup>。

### 3 生态系统管理启示

生态系统服务理论在管理中的应用可以有效改善生态系统管理状况、提高生态系统服务供给能力、改善人类生存与发展环境,科学认识生态系统服务的基本特征能够为生态系统管理提供以下启示。

#### 3.1 提高生态系统质量

生态系统质量是影响生态系统服务的核心因素之一,提升生态系统质量对生态系统服务供给能力的提高具有重要意义,可以通过以下途径实现。

(1) 实施生态保护工程。近年来,我国实施了天然林保育、退耕还林还草等一系列生态保护工程,植被覆盖率有所提高,国土呈现出明显的绿化趋势<sup>[64-65]</sup>,自然生态系统质量得到改善。生态保护工程实施应当综合考虑气候、地形等自然条件,结合当地实际情况与生态环境特点<sup>[66]</sup>。

(2) 落实生态红线制度。划定生态红线有助于国土生态空间的优化、保持生态功能的稳定、改善生态系统质量并提升生态系统服务。城市化、人口增长及经济开发活动导致自然生态系统质量下降,划定生态红线可控制城镇扩张,限制开发建设强度,避免生态系统质量恶化<sup>[67]</sup>。

(3) 生态恢复。对于生态系统质量严重恶化或已出现退化的生态系统,有必要通过人为干预的方式,采取适当措施进行生态恢复。限制人类活动(放牧、采伐和排污等)<sup>[68-69]</sup>,能够减轻生态系统胁迫,提升生态系统服务;种群结构调控、土地利用方式改变等直接干预手段<sup>[70]</sup>能够更为明显地改善生态系统质量,提高生物多样性及生态系统服务的供给。

#### 3.2 辨识和保护高保护价值区域

由于生态系统服务存在空间异质性,区域间保护价值也存在较大的差异,因此有必要量化并辨识不同区域的保护价值,采取有针对性的生态系统管理措施<sup>[71]</sup>。

(1) 生态系统服务的量化与可视化。生态系统服务的量化与制图是管理决策从提出到实施过程中的基础性工作<sup>[72]</sup>,应用于决策制定初期。生态系统服务量化与制图是对生态系统服务的种类、数量、分布和相互关系等进行可视化描述与表达的过程<sup>[73]</sup>,其主要流程为:采用定量指标、模型模拟等方

法,表征生态系统服务在空间上的分布情况及其重要性等级;借助空间分析等技术,明确重点生态功能区的主导服务与功能;依据分析结果,确定生态功能定位及保护价值,分区域、分类别进行保护与管理。

(2) 优先保护区的确定及分类管理。为有效避免城市化、工业与农业等经济开发活动对关键的生态系统服务造成损害,既要根据其空间分异规律实施分类、分区管理,也要确定优先保护区域以构建生态安全格局<sup>[74]</sup>。《全国生态功能区划》遵循主导功能、区域相关性、生态系统分异及等级性等原则,将我国划分为不同类型、不同级别的生态功能区<sup>[75]</sup>,为我国生态环境保护、生态安全格局的构建提供了依据,有助于明确区域主要生态问题并采取针对性的保护与恢复措施。

#### 3.3 维护生态系统服务过程的完整性

生态系统管理应维护生态系统服务形成、传递和使用等过程的完整性,维持能量流、物质流、信息流和服务流的畅通。将不同的生态系统整合为景观单元,通过土地利用调整景观组成或构型,在景观或区域尺度上采取管理措施通常更为有效<sup>[76-77]</sup>。

(1) 调整景观组成。景观组成指生态系统或土地利用类型的数量及比例,增加生态系统服务提供单元的面积可直接增加服务供给<sup>[78]</sup>。如农业景观中,提高自然或半自然生态系统的面积能够增加授粉昆虫的多样性,提升授粉及粮食供给服务<sup>[79]</sup>。生物控制服务的基本过程与天敌、鸟类等服务提供单元及害虫等损害产生单元均有关联<sup>[39]</sup>,且在农田和景观尺度受人为因素影响,因此通过生物控制服务提升的手段实现病虫害的防治,除在生态系统尺度上采取直接干预手段外(如灭虫剂的使用),也可考虑增加农业景观中森林、草地的覆盖度<sup>[37,80]</sup>。

(2) 优化景观构型。景观构型指生态系统或土地利用类型的空间分布及排列情况<sup>[78]</sup>,适当增加景观构型异质性,能够维护生态系统服务过程的完整性<sup>[22]</sup>。城镇化及集约农业造成了自然栖息地破碎化,将增加某些病毒宿主存活率并导致疾病传播,适当增加人工生态系统边缘的复杂度,有助于抑制宿主的活动,提高疾病控制服务并降低传染病的风险<sup>[43]</sup>。提高农业生态系统边缘自然或半自然生境的复杂程度,其中动植物组成的复杂程度也随之提高,并提升授粉、生物控制等服务的供给<sup>[37-38,81]</sup>。

### 3.4 协调生态系统服务权衡关系

理解生态系统服务间的相互作用是生态系统管理的基本前提。目前已有许多研究通过设计干预以及合适的环境管理等手段,尝试最小化甚至消除服务之间的权衡进而实现双赢<sup>[82]</sup>。基于生态系统服务权衡的驱动因素和产生机制,可以通过生态系统、景观尺度、多目标最优和政策干预等途径协调生态系统服务权衡<sup>[58]</sup>。

(1) 生态系统途径。在生态系统中,植物功能性状与耕作管理方式是影响生态系统服务权衡的主要因素。利用不同植物功能性状之间的相关性,可以减少农产品供给与调节服务之间的权衡<sup>[83]</sup>;间作、轮作和多种耕种与森林管理措施<sup>[48,84-85]</sup>常用于协调生态系统服务的权衡,进而消除其负面影响。

(2) 景观尺度途径。景观尺度上,景观组成与格局的优化可能改变生态过程、物种组成和生物多样性<sup>[30,86]</sup>,进而影响生态系统服务之间的相互作用。自然栖息地的保护可以通过提升主导服务功能的供给能力缓解不同类型服务间的权衡<sup>[87]</sup>;确定栖息地与农田的最佳地点与比例,能够在提升作物产量的同时确保调节服务维持较高的水平<sup>[88-89]</sup>。

(3) 多目标最优途径。多目标最优途径可以满足不同利益相关者的多个目标。综合考虑经济和环境目标进行规划,能够协调生物多样性及多种调节服务与农业生产之间的权衡<sup>[87]</sup>。

(4) 政策干预及其他途径。适当的政策干预和市场指导也是协调生态系统服务权衡关系的重要手段,在政策设计与市场制度建立的过程中应综合多方需求。

### 3.5 权衡多尺度利益相关者

不同尺度的利益相关者可使用的生态系统服务类型、数量与质量通常存在差异,其获得的收益和采取的资源利用方式与管理措施也往往相互冲突<sup>[59]</sup>。决策时需综合考虑多尺度利益相关者的角色与关系,通过生态系统综合管理、生态补偿等手段实现双赢甚至多赢。

(1) 生态系统综合管理。以流域生态系统的综合管理为例,面向生态-经济协调发展的流域综合管理将上中下游看作一个整体,注重不同利益相关者的相互联系,能够有效减轻其相互之间的权衡关系并促进生态效益与经济效益的协同增长<sup>[90]</sup>。

(2) 生态补偿。合理可行的生态补偿制度以经

济手段为主协调利益相关者,实现生态系统服务的可持续供给<sup>[91-92]</sup>。如,为实现提高水量、改善水质的目标,北京市与河北省合作实施了密云水库上游退稻还田工程,由用水社区向“稻改旱”农户支付补偿费用,在提高流域生态系统服务的同时确保农户收入不减少,实现了跨地区协作及共赢<sup>[93]</sup>。

此外,农业技术的进步也能够协调多尺度的权衡。如,LU et al<sup>[90]</sup>研究发现提高作物的水分利用效率可增加径流,并削减流域中游作物供给与下游生态可持续性之间的权衡。

## 4 研究展望

生态系统服务研究已取得了显著的进展,但其相关理论与认识在提高各类生态系统服务的供给能力、优化资源与土地利用和提升人类福祉等方面的应用仍需进一步探索。为使生态系统服务理论更有效地服务于管理决策,未来应综合跨学科方法与手段,从多方面深化研究。

### 4.1 强化生态系统服务形成与传递机理研究

生态系统结构-过程-服务框架显示了自然生态系统与社会经济系统的管理,但其背后的生态链接、生态系统服务间的潜在关系及尺度关联等机理,以及气候变化、土地利用变化和人类活动等对生态系统服务的复杂影响仍需深入研究。此外,也应深化理解生态系统服务与人类福祉间的相互关系,厘清生态系统服务的产生-流动-使用过程,为开展生态系统管理提供理论依据<sup>[94]</sup>。

### 4.2 强化生态系统服务评估与综合模拟方法研究

生态系统服务的评估与模拟是探究生态系统服务基本特征并将其应用于管理决策的基础工作,科学有效的方法和手段至关重要。目前,生态系统服务的评估方法逐渐多样化,模型模拟也取得了丰富的成果。然而,模型不确定性较高、缺乏数据支撑等问题,阻碍了研究结果的有效应用。今后在继续完善已有评估与模拟方法的基础上,应充分利用来自自然及社会生态系统的多源数据,结合气候、土地利用方式等关键影响因素,开发与完善相关模拟工具及研究方法。同时,发展多尺度、高分辨率的生态系统服务制图方法,提升量化结果的精确度也值得关注。

### 4.3 加强社会生态系统研究

生态系统服务以人类社会的需求为主导,因此

应当加强社会生态系统研究,完善并扩充现有的以自然生态系统为主的研究体系。宏观层面上,应进一步研究制度、政策和经济发展等对生态系统服务的调控作用,以及土地利用变化、人类活动的交互影响;深化理解不同区域、不同尺度利益相关者的行为、偏好对服务分配及使用产生的影响<sup>[7,95]</sup>。与社会生态系统相结合,突出利益相关者的需求和使使用,关注生态系统服务对经济社会的实际作用,有助于增强研究结果在管理决策中的实用性。

#### 4.4 突出学科交叉

生态系统服务研究具有跨学科、跨领域的属性,涉及多类学科的理论知识与方法技术,多学科交叉也是生态系统服务理论应用于科学管理与决策的重要趋势。生态系统服务的研究与管理需要自然科学与社会科学的结合,构建可实践性更强的框架;在大数据及信息化的发展背景下,区域综合研究、大尺度联网观测等研究成为学科前沿,加强与地理学、信息科学等学科的联系,可应对跨区域、多尺度的生态系统管理的挑战与需求。

#### 参考文献

- [1] COSTANZA R, DARGE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253 – 260.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] HE J, YAN Z, WAN Y. Trade-offs in ecosystem services based on a comprehensive regionalization method: a case study from an urbanization area in China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(5): 179.
- [4] 李双成. 生态系统服务研究思辨[J]. *景观设计学*, 2019, 7(1): 82 – 87.
- [5] HAAREN C, ALBERT C, BARKMANN J, et al. From explanation to application: introducing a practice-oriented ecosystem services evaluation (PRESET) model adapted to the context of landscape planning and management[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(8): 1335 – 1346.
- [6] COSTANZA R, DEGROOT R, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1 – 16.
- [7] FELIPE-LUCIA M R, MARTINLOPEZ B, LAVOREL S, et al. Ecosystem services flows: Why stakeholders' power relationships matter[J]. *PLOS ONE*, 2015, 10(7): e0132232.
- [8] ZODERER B M, TASSER E, CARVER S, et al. Stakeholder perspectives on ecosystem service supply and ecosystem service demand bundles[J]. *Ecosystem Services*, 2019, 37: 100938.
- [9] VILLA F, VOIGT B, ERICKSON J D. New perspectives in ecosystem services science as instruments to understand environmental securities[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2014, 369(1639): 20120286.
- [10] FISHER B, TURNER R K, MORLING P. Defining and classifying ecosystem services for decision making[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643 – 653.
- [11] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 等. 生态系统服务功能管理研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 702 – 710.
- [12] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 等. 2001—2010年洞庭湖生态系统质量遥感综合评价与变化分析[J]. *生态学报*, 2015, 35(13): 4347 – 4356.
- [13] 孙滨峰. 东北森林带生态系统格局、质量、服务功能和胁迫十年变化研究(2000-2010)[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2015.
- [14] SINARE H, GORDON L J. Ecosystem services from woody vegetation on agricultural lands in Sudano-Sahelian West Africa[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200: 186 – 199.
- [15] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 生态恢复中生态系统服务的演变: 趋势、过程与评估[J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6337 – 6344.
- [16] LAVOREL S, GRIGULIS K, LAMARQUE P, et al. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services[J]. *Journal of Ecology*, 2011, 99(1): 135 – 147.
- [17] DELGADO-AGUILAR M J, HINOJOSA L, SCHMITT C B. Combining remote sensing techniques and participatory mapping to understand the relations between forest degradation and ecosystems services in a tropical rainforest[J]. *Applied Geography*, 2019, 104: 65 – 47.
- [18] BENAYAS J M R, NEWTON A C, DIAZ A, et al. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis[J]. *Science*, 2009, 325(5944): 1121 – 1124.
- [19] 丁肇慰, 肖能文, 高晓奇, 等. 长江流域 2000—2015 年生态系统质量及服务变化特征[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1308 – 1314.
- [20] 卢慧婷, 黄琼中, 朱捷缘, 等. 拉萨河流域生态系统类型和质量变化及其对生态系统服务的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8911 – 8918.
- [21] LI P, SHENG M Y, YANG D W, et al. Evaluating flood regulation ecosystem services under climate, vegetation and reservoir influences[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105642.
- [22] 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[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6412 – 6421.
- [23] 赵文武, 刘月, 冯强, 等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139 – 151.
- [24] GRIMM N B, GROFFMAN P, STAUDINGER M, et al. Climate change impacts on ecosystems and ecosystem services in the United States: process and prospects for sustained assessment[J]. *Climatic Change*, 2016, 135(1): 97 – 105.
- [25] RUNTING R K, LOVELOCK C E, BEYER H L, et al. Costs and

- opportunities for preserving coastal wetlands under sea level rise[J]. *Conservation Letters*, 2017, 10(1): 49 – 57.
- [26] BAGSTAD K J, SEMMENS D J, WAAGE S, et al. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation[J]. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 27 – 39.
- [27] AHMED M A A, ABD-ELRAHMAN A, ESCOBEDO F J, et al. Spatially-explicit modeling of multi-scale drivers of aboveground forest biomass and water yield in watersheds of the Southeastern United States[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 199: 158 – 171.
- [28] 饶恩明, 肖焱. 四川省生态系统土壤保持功能空间特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8741 – 8749.
- [29] ANDERSSON E, MCPHEARSON T, KREMER P, et al. Scale and context dependence of ecosystem service providing units[J]. *Ecosystem Services*, 2015, 12: 157 – 164.
- [30] QIU J X, TURNER M G. Importance of landscape heterogeneity in sustaining hydrologic ecosystem services in an agricultural watershed[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(11): 1 – 19.
- [31] 杨冕, 张艺千, 王春晓. 湖北省关键生态系统服务供需状况的时空变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(9): 2080 – 2091.
- [32] RICKETTS T H. Tropical forest fragments enhance pollinator activity in nearby coffee crops[J]. *Conservation Biology*, 2004, 18(5): 1262 – 1271.
- [33] MACE G M, NORRIS K, FITTER A H. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2012, 27(1): 19 – 26.
- [34] VAUGHN C C. Ecosystem services provided by freshwater mussels[J]. *Hydrobiologia*, 2018, 810(1): 15 – 27.
- [35] COSTA A, SILVA B, GERARDO J, et al. Structural simplification compromises the potential of common insectivorous bats to provide biocontrol services against the major olive pest *Prays oleae*[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 287: 106708.
- [36] TEIXEIRA D G, MARQUES S P, GARABINI C T, et al. The effects of landscape patterns on ecosystem services: meta-analyses of landscape services[J]. *Landscape Ecology*, 2018, 33: 1247 – 1257.
- [37] DIEKTTER T, WAMSER S, WOLTERS V, et al. Landscape and management effects on structure and function of soil arthropod communities in winter wheat[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(1-2): 108 – 112.
- [38] FAHRIG L, GIRARD J, DURO D, et al. Farmlands with smaller crop fields have higher within-field biodiversity[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200: 219 – 234.
- [39] MAAS B, CLOUGH Y, TSCHARNTKE T. Bats and birds increase crop yield in tropical agroforestry landscapes[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(12): 1480 – 1487.
- [40] MAAS B, TSCHARNTKE T, SALEH S, et al. Avian species identity drives predation success in tropical cacao agroforestry[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(3): 735 – 743.
- [41] RUSCH A, CHAPLIN-KRAMER R, GARDINER M M, et al. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 198 – 204.
- [42] HAHN M B, GANGNON R E, CHRISTOVAM B, et al. Influence of deforestation, logging, and fire on malaria in the Brazilian Amazon[J]. *PLOS ONE*, 2014, 9(1): e85725.
- [43] PRIST P R, URIARTE M, TAMBOSI L R, et al. Landscape, environmental and social predictors of Hantavirus risk in São Paulo, Brazil[J]. *PLOS ONE*, 2016, 11(10): e0163459.
- [44] WETERINGS R, UMPONSTIRA C, BUCKLEY H L. Landscape variation influences trophic cascades in dengue vector food webs[J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaap9534.
- [45] BARBIER E B, KOCH E W, SILLIMAN B R, et al. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values[J]. *Science*, 2008, 319: 321 – 323.
- [46] RODRÍGUEZ J, BEARD JR T D, BENNETT E, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services[J]. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 709 – 723.
- [47] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379 – 1390.
- [48] DARYANTO S, FU B, ZHAO W. Evaluating the use of fire to control shrub encroachment in global drylands: A synthesis based on ecosystem service perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 648: 285 – 292.
- [49] PAN Y, WU J X, XU Z R. Analysis of the tradeoffs between provisioning and regulating services from the perspective of varied share of net primary production in an alpine grassland ecosystem[J]. *Ecological Complexity*, 2014, 17: 79 – 86.
- [50] GENELETTI D, SCOLOZZI R, ADEM ESMAIL B. Assessing ecosystem services and biodiversity tradeoffs across agricultural landscapes in a mountain region[J]. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2018, 14(1): 189 – 209.
- [51] SCHIRPKE U, CANDIAGO S, VIGL L E, et al. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 928 – 941.
- [52] LESTER S E, COSTELLO C, HALPERN B S, et al. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning[J]. *Marine Policy*, 2013, 38: 80 – 89.
- [53] MOUCHET M A, LAMARQUE P, MARTÍN-LÓPEZ B, et al. An interdisciplinary methodological guide for quantifying associations between ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 298 – 308.
- [54] DADE M C, MITCHELL M G E, MCALPINE C A, et al. Assessing ecosystem service trade-offs and synergies: The need for a more mechanistic approach[J]. *Ambio*, 2019, 48(10): 1116 – 1128.



- [55] LI Z H, DENG X Z, JIN G, et al. Tradeoffs between agricultural production and ecosystem services: A case study in Zhangye, Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 136032.
- [56] LI B J, CHEN D X, WU S H, et al. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: Case study of Nanjing City, China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 416 – 427.
- [57] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 592 – 602.
- [58] ZHENG H, WANG L J, WU T. Coordinating ecosystem service trade-offs to achieve win-win outcomes: A review of the approaches[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 82(8): 103 – 112.
- [59] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的尺度特征[J]. *生态学杂志*, 2007(9): 1432 – 1437.
- [60] SCHOLE S R, REYERS B, BIGGS R, et al. Multi-scale and cross-scale assessments of social-ecological systems and their ecosystem services[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 16 – 25.
- [61] HU Y N, PENG J, LIU Y X, et al. Integrating ecosystem services trade-offs with paddy land-to-dry land decisions: A scenario approach in Erhai Lake Basin, southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 849 – 860.
- [62] LÓPEZ-HOFFMAN L, VARADY R G, BALVANERA F P, et al. Ecosystem services across borders: a framework for trans-boundary conservation policy[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2010, 8(2): 84 – 91.
- [63] SHAN Y M, CHEN D M, GUAN X X, et al. Seasonally dependent impacts of grazing on soil nitrogen mineralization and linkages to ecosystem functioning in Inner Mongolia grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1943 – 1954.
- [64] CHEN C, PARK T, WANG X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122 – 129.
- [65] MACIAS-FAURIA M. Satellite images show China going green[J]. *Nature*, 2018, 553(7689): 411 – 413.
- [66] 刘鸿雁. 中国大规模造林变绿难以越过胡焕庸线[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(11): 1831 – 1832.
- [67] 徐德琳, 邹长新, 徐梦佳, 等. 基于生态保护红线的生态安全格局构建[J]. *生物多样性*, 2015, 23(6): 740 – 746.
- [68] FEDRIGO J K, ATAIDE P F, AZAMBUJA FILHO J, et al. Temporary grazing exclusion promotes rapid recovery of species richness and productivity in a long-term overgrazed Campos grassland[J]. *Restoration Ecology*, 2018, 26(4): 677 – 685.
- [69] 余辉. 日本琵琶湖流域生态系统的修复与重建[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(1): 36 – 43.
- [70] 吴舒尧, 黄姣, 李双成. 不同生态恢复方式下生态系统服务与生物多样性恢复效果的整合分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(20): 6986 – 6999.
- [71] TURNER W R, KATRINA B, BROOKS T M, et al. Global conservation of biodiversity and ecosystem services[J]. *Bioscience*, 2007, 57(10): 868 – 873.
- [72] NAIDOO R, BALMFORD A, COSTANZA R, et al. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9495 – 9500.
- [73] 张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 316 – 325.
- [74] JOHNSON C N, BALMFORD A, BROOK B W, et al. Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene[J]. *Science*, 2017, 356(6335): 270 – 275.
- [75] 环境保护部, 中国科学院. 全国生态功能区划[N]. *中国环境报*, 2015-12-01(006).
- [76] GEERTSEMA W, ROSSING W A, LANDIS D A, et al. Actionable knowledge for ecological intensification of agriculture[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2016, 14(4): 209 – 216.
- [77] ISBELL F, GONZALEZ A, LOREAU M, et al. Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales[J]. *Nature*, 2017, 546(7656): 65 – 72.
- [78] FAHRIG L, BAUDRY J, BROTONS L, et al. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(2): 101 – 112.
- [79] DAINESE M, LUNA D I, SITZIA T, et al. Testing scale-dependent effects of seminatural habitats on farmland biodiversity[J]. *Ecological Applications*, 2015, 25(6): 1681 – 1690.
- [80] BIRKHOFFER K, DIEHL E, ANDERSSON J, et al. Ecosystem services—current challenges and opportunities for ecological research[J]. *Frontiers in Ecology & Evolution*, 2015, 2(87): 1 – 12.
- [81] MITCHELL M G E, BENNETT E M, GONZALEZ A. Agricultural landscape structure affects arthropod diversity and arthropod-derived ecosystem services[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 192: 144 – 151.
- [82] HOWE C, SUICH H, VIRA B, et al. Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 263 – 275.
- [83] SOMARRIBA E, CERDA R, OROZCO L, et al. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 173: 46 – 57.
- [84] ZHENG H, WANG L J, PENG W J, et al. Realizing the values of natural capital for inclusive, sustainable development: Informing China's new ecological development strategy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(17): 8623 – 8628.
- [85] EYVINDSON K, REPO A, MÖNKKÖNEN M. Mitigating forest biodiversity and ecosystem service losses in the era of bio-based economy[J]. *Forest Policy and Economics*, 2018, 92: 119 – 127.
- [86] WONG C P, JIANG B, BOHN T J, et al. Lake and wetland

- ecosystem services measuring water storage and local climate regulation[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 3197 – 3223.
- [87] KENNEDY C M, HAWTHORNE P L, MITEVA D A, et al. Optimizing land use decision-making to sustain Brazilian agricultural profits, biodiversity and ecosystem services[J]. *Biological Conservation*, 2016, 204: 221 – 230.
- [88] SABATIER R, DOYEN L, TICHIT M. Heterogeneity and the trade-off between ecological and productive functions of agro-landscapes: a model of cattle-bird interactions in a grassland agroecosystem[J]. *Agricultural Systems*, 2014, 126: 38 – 49.
- [89] JOHNSON J A, RUNGE C F, SENAUER B, et al. Global agriculture and carbon trade-offs[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(34): 12342 – 12347.
- [90] LU Z X, WEI Y P, XIAO H L, et al. Trade-offs between midstream agricultural production and downstream ecological sustainability in the Heihe River basin in the past half century[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 152: 233 – 242.
- [91] BROWNSON K, GUINESSEY E, CARRANZA M, et al. Community-Based Payments for Ecosystem Services (CB-PES): Implications of community involvement for program outcomes[J]. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100974.
- [92] CALLE A. Can short-term payments for ecosystem services deliver long-term tree cover change?[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101084.
- [93] ZHENG H, ROBINSON B E, LIANG Y C, et al. Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(41): 16681 – 16686.
- [94] CHAIGNEAU T, BROWN K, COULTHARD S, et al. Money, use and experience: Identifying the mechanisms through which ecosystem services contribute to wellbeing in coastal Kenya and Mozambique[J]. *Ecosystem Services*, 2019, 38: 100957.
- [95] RAUM S. A framework for integrating systematic stakeholder analysis in ecosystem services research: Stakeholder mapping for forest ecosystem services in the UK[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 170 – 184.