

面向国土空间规划的生态系统服务可持续性评估 框架研究*

Study on the Evaluation Framework of the Sustainability of Ecosystem Services for Spatial Planning

管青春 GUAN Qingchun

摘要 生态系统服务可持续性评估可为国土空间规划和生态系统服务综合管理提供有效的信息。首先界定生态系统服务可持续性的概念,并对土地利用与生态系统服务的关系、生态系统服务供需与生态系统服务可持续性的关系、生态系统服务权衡与生态系统服务可持续性的关系进行分析。在此基础上,基于供需关系的视角提出从供需数量、供需质量、供需功能效益3个维度构建“供给率”“供需比”“供需匹配度”“供需协调度”“权衡协同度”5个指标,综合构成生态系统服务可持续性的评估框架,为评估生态系统服务可持续性提供理论方法,以期为区域实现生态系统服务可持续发展提供科学依据。

Abstract The ecosystem service sustainability assessment provides effective information for the integrated management of land space planning and ecosystem system services. The study defines the concept of ecosystem service sustainability, and analyzes the relationship between land use and ecosystem services, between ecosystem service supply and demand and ecosystem service sustainability, and between ecosystem service trade-off and ecosystem service sustainability. Based on supply and demand, five indicators of supply rate, supply and demand ratio, matching degree, coordination degree, and synergy degree are presented from three dimensions. A theoretical approach is provided to assess the sustainability of ecosystem services with a view to providing a scientific basis for the sustainable development of ecosystem services in the region.

关键词 生态系统服务;可持续性;供需;国土空间规划;区域

Key words ecosystem services; sustainability; supply and demand; territory spatial planning; region

文章编号 1673-8985 (2020) 01-0023-06 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20200105

作者简介

管青春

中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院
讲师,博士

我国经过改革开放40年的快速发展,生态系统服务(Ecosystem services)因长期的资源开发利用和人口压力出现严重退化,由此引发生态环境持续恶化,生态安全面临着严峻的挑战。生态系统服务可持续发展是我国生态文明建设、中华民族永续发展的关键。因此,如何通过合理利用土地资源来实现生态系统服务的可持续性、提升人类福祉,是亟需关注和解决的问题。本文以生态系统服

务供给与人类社会发展需求再平衡为基本出发点,从生态系统服务供需数量、供需质量、功能效益3个维度构建生态系统服务可持续性评估框架,以期为国土空间规划和生态系统服务管理提供科学依据与方法路径。

1 生态系统服务可持续性概念

生态系统服务是指生态系统所形成并维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效应^[1],

*基金项目:国家自然科学基金“复杂城市地表不透水面多源高分遥感成像机理与分层优化提取方法”(编号41971292)。

人类直接或间接从生态系统得到的所有收益^{[2]1277}。利益主体的经济活动和行为方式对生态系统服务产生巨大的需求,并导致生态系统服务数量、质量和功能效益发生改变。因此,人类社会和经济代谢的生态系统服务需求必须维持在生态系统的环境容纳量和生态系统服务供给的最大阈值以内,以实现生态系统服务可持续发展。本文从生态系统服务供给和需求角度将生态系统服务可持续性分为狭义和广义的定义。狭义的生态系统服务可持续性是指其长期提供服务的能力^[3],在世代间、代际和大范围内保持可持续的生态系统服务^[4];从以人为本的角度可以解释为:“生态系统在长期和广泛的基础上提供生态系统服务”^[5]。广义的生态系统服务可持续性是指由生态系统形成的环境条件和效用,在人类社会对其消耗过程中,维持生态系统服务数量、质量和功能效益协同发展,并在保持其结构完整性和组织自主性的同时为人类社会提供永续利用的综合能力。

2 土地利用与生态系统服务的关系

陆地生态系统是人类生存的主要场所,为人类社会提供了重要的产品与服务。人类对生态系统服务进行选择利用从而出现了不同的土地利用类型,土地是生态系统服务的提供者,不同利用类型的土地提供生态系统服务的能力不同;土地利用结构是生态系统服务提供的基础,它是生态系统形成支持、供给、调节和文化服务的重要前提。土地利用变化对生态系统的完整性有直接的影响,被认为是生态系统服务变化的重要驱动之一。土地利用结构和功能的变化受人类活动的影响,进而影响生态系统服务供给的类型、数量和质量。人类为了满足自身的需求往往通过改变土地利用类型以及其空间格局来实现生态系统服务利益的最大化。人类活动对土地利用的作用主要表现在两方面,一方面是结构上的变化,另一方面是空间格局分布上的变化。但不管是哪方面的变化,最终都会影响生态系统的结构、过程和功能^{[6]125}。

近几十年人口快速增长,城市面积和耕地

面积快速扩张,造成对淡水等资源以及农药化肥等物质的需求快速上升;与此同时,人类为了应对这种情况,增加土地集约利用强度,而高集约高强度的土地利用方式降低了生态系统可持续供应淡水、食物等资源产品的能力。此外,调节气候、空气质量以及防控疾病的能力也显著下降。土地利用变化对生态系统服务变化的影响主要表现在以下几个方面。

2.1 对生物多样性的影响

人类通过土地利用影响生物多样性,主要途径包括:①当发生土地利用类型转型时,直接去除该土地上的生物,如林地转为农田或建设用地。②对生物传播或迁徙造成阻碍,如人类对土地进行开发利用时造成生境破碎化,降低了基因交流并阻碍了物种扩散或迁徙。③改变生物的生存环境,当生境由自然环境转变为人工环境时,会使生物生长及发育受到抑制,导致物种变异。此外,农业土地利用对生物多样性的影响尤为明显,长期的农业土地集约化利用及快速的城市化发展使得农业区域植被单一,直接影响生物多样性^[7](例如我国华北平原)。

2.2 对供给服务的影响

由于生态系统服务提供的产品和服务是人类生存的基本需求,因此,通过对土地利用开发等活动追求供给服务效益最大化是人类社会很多地区的普遍做法。例如为了解决粮食短缺问题,将林地和草地开垦为农田。人类社会对于某些供给服务的过度需求必然造成生态系统整体服务供给能力退化,进而导致生态系统服务的可持续性降低^{[6]121}。

2.3 对调节服务的影响

人类对土地利用的改变而导致调节服务的变化经常是在无意识下进行的,由于不同的土地利用方式与土地利用类型对降水的截留、蒸腾的作用不同,因此,土地利用变化不仅会导致地下水和地表水的水量变化,还会对水质及径流的时空特征产生影响。如建设

用地会减少或阻挡水流下渗,增大地表水径流量,因而增加洪水灾害的风险^{[6]123}。

2.4 对文化服务的影响

文化服务是指人类通过精神满足、发展认知思考、消遣和体验美感,从生态系统获得的非物质收益^[8]。随着城市化的发展及人类生活水平的提高,人类对自然风景和美感享受的需求不断增加。然而由于人类开发引起的土地利用变化对自然景观的破坏越来越严重,自然景观的数量逐渐减少,其美学价值逐渐消失。人类活动通过土地利用变化影响文化服务的途径有两种:一种是直接影响,如交通用地、工矿用地等对自然或文化景观切割蚕食,使其面积缩小,价值降低;另一种是间接影响,人类由于对土地利用方式的改变,对大气环境、地表径流及土壤侵蚀等产生影响,进而对自然或文化景观环境和美感价值产生影响^{[6]124}。

3 生态系统服务供需与生态系统服务可持续性的关系

生态系统服务的供给和需求反映生态系统和人类社会间复杂的动态关联,明确生态系统服务的产生、传递和消耗过程,区分生态系统服务的潜在供给、实际供给和人类需求,深入解析和认识生态系统服务供给和需求的关系,揭示生态系统服务供给和需求的差异,对促进生态系统和社会经济的可持续发展有重要意义。在空间尺度上,不仅要权衡生态系统服务供给与需求的关系,确保生态系统服务孕育、传递及发生的完整性,实现生态系统服务供需空间的可持续性;同时,在时间尺度上,生态系统服务供给既要满足当下又要满足长远目标下的生态系统服务需求。因此,从时空格局上明晰生态系统服务供需关系变化,是制定满足生态系统服务可持续性的供给模式并实现社会和自然可持续发展的关键。

4 生态系统服务权衡与生态系统服务可持续性的关系

人类需求的急剧增长与生态系统服务可持续供应能力的下降,使得人类社会必须面对权衡需求以及维持生态系统长期提供产品和服务能力的挑战^[9]。生态系统服务提供的服务类型以及人类对其使用的程度不尽相同,不同生态系统服务类型之间的相互作用关系复杂,但可简单地归纳为权衡和协同两种关系^{[6]172}。通过分析生态系统服务之间的权衡协同关系,有助于生态系统和土地利用采取有效的管理策略以及技术手段,形成多种服务类型,达到生态、社会和经济效益兼顾的共赢效果^[10] (见图1)。

土地利用方式和类型变化过程不仅是生态系统由自然主导向人类主导变化的过程,同时也是生态系统提供的服务种类和数量发生变化的过程。不同土地利用方式和利用强度对生态系统服务的影响是引起生态系统服务之间的权衡或协同关系的表征^[11]。土地利用变化引起生态系统服务之间关系的变化呈现此消彼长的权衡,抑或各种服务均有所提升或均有所下降。不同土地利用类型在相应的利用强度下,提供整个生态系统服务簇的能力不同。也就是说,土地利用变化不仅是对单一的服务类型的改变,同时也会对整个生态系统服务簇产生影响^[12]。目前,在土地利用规划和决策中,往往忽视经济效益以外的生态系统服务。由此,具有多功能及较高生态价值的生态系统服务类型(土地利用类型)常常被转型为单一功能的土地类型。从整体上看,这种土地利用方式是将区域短期及少数人的经济利益建立在区域长期及大多数人生态、经济和社会效益的损失上^{[6]126}。

明晰生态系统服务权衡和协同的表现类型及区域差异对于制定区域发展与生态保护“双赢”的政策措施,实现区域生态效益最大化及生态系统服务可持续性具有重要意义。兼顾多种生态系统服务之间的协调发展,实现效益最大化,可以实现生态系统服务的可持续发展,提升人类的福祉。

5 生态系统服务可持续性评估理论框架构建

生态系统服务可持续性的本质是由生态系统服务的承载力、利用程度、发展状态和功能效益的变化所决定的。鉴于此,本文通过生态系统服务的潜在供给、实际供给及需求之间的过程关系,采用潜在供给—实际供给、潜在供给—需求、实际供给—需求分析生态系统服务从自然生态系统流向人类社会系统的动态耦合过程,分别从生态系统服务供需数量、供需质量和供需功能效益3个维度,评估生态系统服务可持续性,构建生态系统服务可持续分析框架。尝试回答目前区域生态系统服务可持续性面临的供需总量失衡、供需质量失调、供需功能效益单一化等问题,并对其进行解析。

生态系统结构和过程构成生态系统的完整性,并由此产生生态系统服务。土地利用覆被的变化直接影响生态系统的完整性,并间接影响生态系统服务供给的能力。人类社会对生态系统服务的需求也因此随着供应能力和社会因素而发生变化^[13]。生态系统服务的潜在供给产生于自然生态系统,代表生态系统服务的库存量,是生态系统以可持续的方式长期提供服务的能力^[14];生态系统服务实际供给指自然系统能被实际使用的生态系统服务和其他产品^[15];人类需求来源于社会系统,是人类对生态系统产品和服务的消费和使用^[16-17]。因此,生态系统服务的传递过程经历了潜在供给、实际供给(流)和需求3个基本环节^[18-19]。生态系统服务潜在供给为生态系统服务产生的起点即为自然系统属性,生态系统服务需求为生态系统服务的终点即社会系统属性,生态系统服务实际供给在此过程中发生消减或产生作用,即自然—社会系统属性,三者体现了生态系统与人类社会之间的相互作用^{[2]1283} (见图2)。

生态系统服务供给不仅包括数量和质量方面,同时,还包括由于人类社会需求的偏好导致生态系统服务之间的权衡所出现的生态系统服务功能效益方面。

5.1 生态系统服务数量

生态系统服务数量一方面是反映区域生态系统服务供给的利用程度,另一方面是反映生态系统服务的供需盈余状况。基于潜在供给—实际供给、实际供给—需求的关系,构建“供给率”和“供需比”两个指标。

生态系统服务潜在供给传递到实际供给为人类社会所利用时,会发生消减和消耗,通过潜在供给与实际供给之间的关系可以反映特定时间和区域内生态系统服务潜在供给转换为实际供给的能力,即生态系统服务“供给率”^[20]。

其公式如下:

$$\text{供给率} = \frac{\text{实际供给}}{\text{潜在供给}} \quad (1)$$

根据公式可知,供给率的取值范围在 $[0, +\infty]$,供给率 ≥ 1 时,表示生态系统服务实际转化率高,被充分利用;供给率 < 1 时,表示生态系统服务实际转化率低,未被充分利用。

生态系统服务实际供给被人类社会利用,同时人类需求随着社会变化而变化,人类需求可能会导致对生态系统服务实际供给的利用超过其本身的能力。因此,实际供给与需求之间的关系可以表征生态系统服务的实际供给能否满足生态系统服务需求的状况。反映实际供给与需求之间的盈余状况,即为生态系统服务“供需比”。

其公式如下:

$$\text{供需比} = \frac{\text{人类需求}}{\text{实际供给}}, \quad \begin{cases} < 1, \text{ 盈余状态} \\ = 1, \text{ 平衡状态} \\ > 1, \text{ 亏损状态} \end{cases} \quad (2)$$

根据公式可知,供需比 < 1 时,表示生态系统服务供给能够满足需求,为盈余状态;供需比 $= 1$ 时,表示生态系统服务供给能够满足需求,且供给与需求均衡,为平衡状态;供需比 > 1 时,表示生态系统服务供给不能满足需求,为亏损状态。

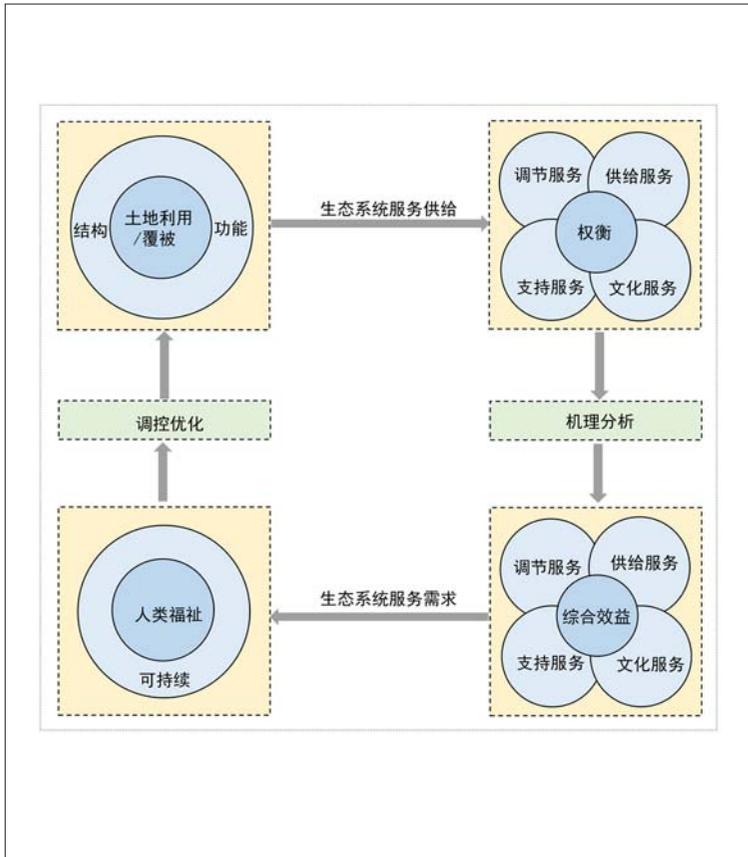


图1 生态系统服务权衡机理
资料来源:笔者自绘。

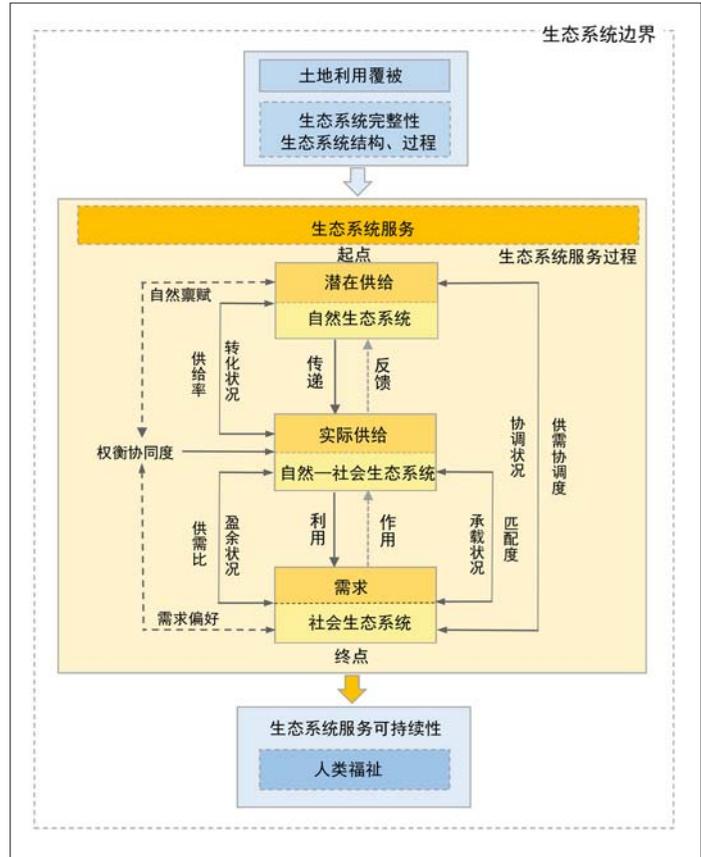


图2 生态系统服务可持续性分析机理框架图
资料来源:笔者自绘。

5.2 生态系统服务质量

生态系统服务供需质量是指区域内生态系统服务供给能够承载和满足人类日益增长的多样化的需求,并且在生态系统服务从供给到需求过程中两者的发展速度协调良好。生态系统服务承受人类社会需求的作用量存在一定的阈值,该阈值取决于生态系统服务的本底和自然状态,也取决于人类作用的方向、规模、方式等。当人类社会需求在一定的范围内时,生态系统服务可以通过潜在供给的自我调节和弹性来最大程度地满足人类社会需求;但当人类社会需求超过一定的限度时,即潜在供给能够提供的产品和服务濒临匮乏,整个生态系统就会出现崩溃,这个最大限度就是生态系统服务的承载力。

生态系统服务“供需匹配度”是检验生态系统服务能否承载人类社会需求的重要指标,它对于约束人类活动的强度和过度增长的

需求具有重要的作用。供需匹配度是度量区域内生态系统服务供给承载人类日益增长的多样化需求的阈值范围及空间配置的均衡程度。

其公式如下:

$$\text{供需匹配度} = \frac{\text{潜在供给}}{\text{人类需求}}, \begin{cases} < 1, & \text{不可承载状态} \\ = 1, & \text{均衡状态} \\ > 1, & \text{可承载状态} \end{cases} \quad (3)$$

式中,供需匹配度>1表示供给和需求匹配(包括一般均衡(1.00, 1.10)等级、良好匹配(1.10, 2.00)等级、优质匹配(2.00, +∞)等级),生态系统服务供给和需求处于可承载状态;供需匹配度=1表示供给和需求完全均衡,生态系统服务供给和需求处于均衡状态;供需匹配度<1表示供给和需求不匹配(包括轻度失配等级(0.85, 1.00)、勉强失配等级(0.50, 0.85)、严重失配等级

(0.00, 0.50)),生态系统服务供给和需求处于不可承载状态^[21]。

协调是指两种或两种以上系统或系统要素之间的一种良性的相互关联,是系统之间或系统内要素之间配合得当、和谐一致、良性循环的关系^[22]。协调是多个系统或要素保持健康发展的保证。协调度则是度量系统或要素之间协调状况好坏程度的定量指标。在生态系统演化过程中需要生态系统服务实际供给和人类社会需求保持发展一致,并且两者的关系为“齐头并进”的状态,才能实现区域生态系统服务的可持续发展。

其公式如下:

$$\text{供需协调度} = \sqrt{\frac{\text{实际供给} \times \text{人类需求}}{\left(\frac{\text{实际供给} + \text{人类需求}}{2}\right)^2}} \quad (4)$$

根据公式可知,供需协调度(C_v)的取

值在[0, 1]之间。供需协调度 (C_v) =1时,为最佳协调状态;供需协调度 (C_v) =0时,为最不协调状态,即供需完全失调。本文借鉴Ma^[23]的研究成果将供需协调度划分为12等。供需协调度划分标准如下:

$$C_v = \begin{cases} [0.00, 0.05) & \text{完全失调} \\ [0.05, 0.10) & \text{极度失调} \\ [0.10, 0.20) & \text{严重失调} \\ [0.20, 0.30) & \text{中度失调} \\ [0.30, 0.40) & \text{轻度失调} \\ [0.40, 0.50) & \text{濒临失调} \end{cases} \quad C_v = \begin{cases} [0.50, 0.60) & \text{基本协调} \\ [0.60, 0.70) & \text{勉强协调} \\ [0.70, 0.80) & \text{初级协调} \\ [0.80, 0.90) & \text{中级协调} \\ [0.90, 0.95) & \text{良好协调} \\ [0.95, 1.00] & \text{优质协调} \end{cases}$$

5.3 生态系统服务功能效益

生态系统服务供需功能效益是指生态系统服务之间实际利用的均衡性及多功能综合效益的最大化,它是由于人类社会需求的偏好导致生态系统服务之间的权衡所出现的生态系统服务多功能效益的变化。权衡在一种生态系统服务的供给由于另外一种生态系统服务的增加而减少时发生^{[6]210}。生态系统服务之间存在着权衡关系,生态系统所提供的支持服务、调节服务、供给服务和文化服务被不同的利益相关者使用,并转化成不同利益相关者的收益,通过生态系统服务之间的权衡来满足不同层次的人类生产生活需求,并会通过土地利用方式和类型反映在区域时空格局中,影响区域生态系统服务的可持续性。因此,基于生态系统服务实际供给构建生态系统服务“权衡协同度”。

生态系统服务权衡协同度指标依据数据线性拟合,用来评估区域生态系统服务之间变化量的相互作用,表征各类生态系统服务间相互作用的程度和方向^[24]。权衡协同度越大,实际供给变化量的绝对值越大,生态系统服务多功能协同,综合效益越大,可持续性越强。

其公式如下:

$$TOD_{ij} = \frac{ESC_{ib} - ESC_{ia}}{ESC_{jb} - ESC_{ja}} \quad (5)$$

式中, TOD_{ij} 为第i、j种生态系统服务的权衡协同度; ESC_{ib} 和 ESC_{ia} 分别代表第i

种生态系统服务在时间b和时间a的变化量; ESC_{jb} 、 ESC_{ja} 分别代表第j种生态系统服务在时间b和时间a的变化量。 TOD 用于表征某两种生态系统服务变化量相互作用的程度和方向,当 $TOD < 0$ 时,说明此两种生态系统服务之间为权衡关系;当 $TOD > 0$ 时,说明此两种生态系统服务之间为协同关系; TOD 的绝对值表示此两种生态系统服务的变化量的相对大小^[25]。

综上,生态系统服务可持续性的概念框架是基于对生态系统服务供需过程的组成部分以及过程关系的探讨,从供需数量、供需质量以及供需功能效益3个维度构建“供给率”“供需比”“供需匹配度”“供需协调度”“权衡协同度”5个指标进行表征及解析,形成生态系统服务可持续性分析框架体系,为生态系统服务可持续性评估提供了坚实的理论基础(见图3)。

本文构建了生态系统服务可持续性指数评估模型,将其定义为供需数量、供需质量和供需功能效益最大化的函数,主要包括供给率、供需比、匹配度、协调度和权衡协同度5个分指标,其公式表示为:

$$ESS(n, t) = \prod [B(n, t), D(n, t), M(n, t), C(n, t), T(n, t)] \quad (6)$$

式中, ESS 表示生态系统服务可持续性; B 表示供给率; D 表示供需比; M 表示匹配度; C 表示协调度; T 表示权衡协同度; n 为评价单元; t 为评价年份。

$$\text{生态系统服务可持续性} = \begin{cases} [0.00, 0.20) & \text{可持续性弱} \\ [0.20, 0.40) & \text{可持续性较弱} \\ [0.40, 0.60) & \text{可持续性中等} \\ [0.60, 0.80) & \text{可持续性较强} \\ [0.80, 1.00] & \text{可持续性强} \end{cases} \quad (7)$$

本文采用等距离断点方式对生态系统服务可持续性综合评价进行划分,将其分成可持续性弱、可持续性较弱、可持续性中等、可持续性较强和可持续性强5个等级。

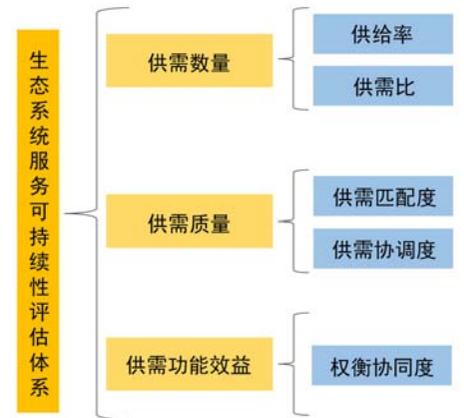


图3 生态系统服务可持续性评估体系
资料来源:笔者自绘。

6 结语

本文界定了生态系统服务可持续性内涵,分析了土地利用与生态系统服务的关系、生态系统服务供需与可持续性的关系、生态系统服务权衡与可持续性的关系。在此基础上,探析了生态系统服务可持续性的内部机理。基于生态系统服务供需过程的视角,构建了生态系统服务可持续性评估框架体系,为生态系统服务可持续性评估提供了理论方法。

生态系统是一个多维度、共生和复合的系统。未来可将生态系统服务可持续性评估框架应用于不同类型的区域进行研究,探索不同尺度的生态系统服务可持续性发展的土地利用模式,为区域生态系统管理和国土空间规划提供更多详实的信息。

参考文献 References

[1] DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
[2] 马琳,刘浩,彭建,等.生态系统服务供给和需求研究进展[J].地理学报, 2017, 72 (7):1277-1289.
MA Lin, LIU Hao, PENG Jian, et al. A review of

- ecosystem services supply and demand[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [3] PAETZOLD A, WARREN P H, MALTBY L L. A framework for assessing ecological quality based on ecosystem services[J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 273-281.
- [4] BURKHARD B, MÜLLER F. Indicating human-environmental system properties: case study northern Fennoscandinavian reindeer herding[J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(6): 828-840.
- [5] MÜLLER F. Indicating ecosystem and landscape organization[J]. *Ecological Indicators*, 2005(5): 280-294.
- [6] 李双成. 生态系统服务地理学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LI Shuangcheng. *The geography of ecosystem services*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [7] 刘云慧, 字振荣, 刘云. 北京东北旺农田景观步甲群落结构的时空动态比较[J]. *应用生态学报*, 2004, 15 (1) : 85-90.
LIU Yunhui, YU Zhenrong, LIU Yun. Temporal and spatial structure of carabid community in agricultural landscape of Dongbeiwang, Beijing[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 85-90.
- [8] Millennium Ecosystem Assessment (MA). Millennium ecosystem assessment: living beyond our means-natural assets and human well-being[M]. World Resources Institute, Washington DC, USA, 2005.
- [9] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [10] 潘竟虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (17) : 280-289.
PAN Jinghu, LI Zhen. Analysis on trade-offs and synergies of ecosystem services in arid inland river basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(17): 280-289.
- [11] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策[J]. *地理学报*, 2017, 72 (6) : 960-973.
PENG Jian, HU Xiaoxu, ZHAO Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: from cognition to decision-making[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 960-973.
- [12] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. *地理科学进展*, 2017, 36 (12) : 1571-1581.
WU Wenhuan, PENG Jian, LIU Yanxu, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(12): 1571-1581.
- [13] BURKHARD B, KROLL F, NEDKOV S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [14] 刘绿怡, 刘慧敏, 任嘉衍, 等. 生态系统服务形成机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 28 (8) : 2731-2738.
LIU Lyuyi, LIU Huimin, REN Jiayan, et al. Research progress on the mechanism of ecosystem services generation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2731-2738.
- [15] BURKHARD B, KANDZIORA M, HOU Y, et al. Ecosystem service potential, flows and demands-concepts for spatial localization, indication and quantification[J]. *Landscape Online*, 2014, 34: 1-32.
- [16] WALLACE K J. Classification of ecosystem services: problems and solutions[J]. *Biological Conservation*, 2007, 139: 235-246.
- [17] HAINES-YOUNG R. Exploring ecosystem service issues across diverse knowledge domains using Bayesian Belief Networks[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2011, 35: 681-699.
- [18] VILLAMAGNA A M, ANGERMEIER P L, BENNET E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery[J]. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [19] HAINES-YOUNG R, POTSCHEIN M, KIENAST F. Indicators of ecosystem service potential at European scales: mapping marginal changes and trade-offs[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 39-53.
- [20] 白杨, 王敏, 李晖, 等. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J]. *生态学报*, 2017, 37 (17) : 5846-5852.
BAI Yang, WANG Min, LI Hui, et al. Ecosystem service supply and demand: theory and management application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [21] 管青春, 郝晋珉, 许月卿, 等. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区[J]. *资源科学*, 2019, 41 (7) : 1359-1373.
GUAN Qingchun, HAO Jinmin, XU Yueqing, et al. Zoning of agroecological management based on the relationship between supply and demand of ecosystem services[J]. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1359-1373.
- [22] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. *热带地理*, 1999, 19 (2) : 171-177.
LIAO Chongbin. Quantitative judgement and classification system for coordinated development of environment and economy: a case study of the city group in the Pearl River Delta[J]. *Tropical Geography*, 1999, 19(2): 171-177.
- [23] MA L, JIN F J, SONG Z Y, et al. Spatial coupling analysis of regional economic development and environmental pollution in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(3): 525-537.
- [24] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(13): 4609-4624.
LIU Hai, WU Jing, CHEN Xiaoling. Study on spatial-temporal change and trade-off synergy relationships of ecosystem services in the Danjiangkou water source area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [25] 李鸿健, 任志远, 刘焱序, 等. 西北河谷盆地生态系统服务的权衡与协同分析——以银川盆地为例[J]. *中国沙漠*, 2016, 36 (6) : 1731-1738.
LI Hongjian, REN Zhiyuan, LIU Yanxu, et al. Tradeoffs-synergies analysis among ecosystem services in northwestern valley basin: taking Yinchuan basin as an example[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(6): 1731-1738.