

DOI: 10.5846/stxb202008182151

张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 何思源, 刘某承, 杨伦. 生态系统服务权衡研究进展. 生态学报, 2021, 41(14): 5517-5532.

Zhang B T, Min Q W, Jiao W J, He S Y, Liu M C, Yang L. Research progress and perspective on ecosystem services trade-offs. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5517-5532.

生态系统服务权衡研究进展

张碧天^{1,2}, 闵庆文^{1,2,*}, 焦雯珺¹, 何思源¹, 刘某承¹, 杨 伦¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 生态系统服务作为连接自然与社会生态系统的桥梁, 是社会-生态系统管理和分析的重要工具。生态系统服务权衡研究关注生态系统服务间关系的认知和调节, 对于协调多元目标、最大化人类福祉、支撑社会-生态系统可持续利用具有重要的作用。整理了生态系统服务权衡的内涵和分类, 将生态系统权衡研究分为客观权衡规律和管理权衡决策两大类, 并对两类生态系统服务权衡的研究内容、思路和方法的国内外进展进行了系统梳理。在客观权衡规律方面, 主要包括生态系统服务供与需间权衡规律、生态系统服务供或需间权衡规律两部分, 其中, 供与需间权衡规律包含供需匹配的维度和供需匹配的研究方法两部分, 供或需间权衡规律包含关系识别和驱动力分析两部分; 在管理权衡决策方面, 主要包括生态系统服务管理权衡决策的准则确定和求解思路两部分。最后, 对生态系统服务权衡研究进行了国内外进展的总体评价和研究展望。目前, 客观权衡规律研究较为成熟, 继生态系统服务供给侧权衡研究的热点之后, 需求侧的权衡研究也逐渐增多, 但整体上仍存在研究的应用指向不明、研究结果稳健性不足的问题; 管理权衡决策研究易忽视决策准则的设置问题, 使得决策结果的可行性存疑。因此, 应当提出生态系统服务权衡研究范式, 整合客观权衡规律和管理权衡决策, 提升客观权衡规律研究的应用指向。在客观规律探索方面, 深化对权衡规律驱动机制的研究, 开展多时空尺度耦合研究, 明确权衡规律的稳健性。在权衡决策管理方面, 重视决策标准的设置, 加强多方参与决策, 深入探讨生态系统服务和人类福祉的联系, 使权衡准则更加贴近区域管理的真正需求, 提升决策结果的可行性。在实证研究方面, 权衡决策研究对我国自然保护地的关注不足, 未来应在继续推进城镇地区研究的基础上, 尝试填补保护地的研究空缺, 服务于我国保护地紧迫的权衡管理需求。

关键词: 生态系统服务; 权衡; 社会-生态系统管理; 优化决策

Research progress and perspective on ecosystem services trade-offs

ZHANG Bitian^{1,2}, MIN Qingwen^{1,2,*}, JIAO Wenjun¹, HE Siyuan¹, LIU Moucheng¹, YANG Lun¹

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

Abstract: Ecosystem services, as a bridge connecting natural and social ecosystems, are important tools for social-ecological system management and analysis. Ecosystem services tradeoff researches focus on the cognition and regulation of the relationship between ecosystem services, which plays an important role in coordinating multiple goals, maximizing human well-being, and supporting the sustainable use of social-ecological system. This paper summarizes the connotation and classification of ecosystem service tradeoff, divides ecosystem service tradeoff research into two categories: objective tradeoff law and management tradeoff decision, and systematically reviews the domestic and international progress of the research content, ideas and methods of ecosystem service tradeoff. In terms of objective tradeoff law, it mainly includes tradeoff relationship between ecosystem service supply and demand, and tradeoff relationship between ecosystem service

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0506404)

收稿日期: 2020-08-18; 网络出版日期: 2021-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: minqw@igsnrr.ac.cn

supply or demand. Tradeoff relationship between ecosystem service supply and demand includes matching dimensions and matching research methods. Tradeoff relationship between ecosystem service supply or demand includes relationship recognition and driving force analysis. In the aspect of management tradeoff decision, it mainly includes the criterion determination and the problem-solving ideas. In the end, the overall evaluation and research prospect of the progress at home and abroad were made. At present, the research on objective tradeoff law is relatively mature, and following the supply side, the tradeoff research on the demand side of ecosystem service also gradually increased, but there remains some problems such as unclear application direction and insufficient robustness of research results. In the researches of management tradeoff decision, it is easy to ignore the setting of decision criterion, which makes the feasibility of the result doubtful. We suggested that the research paradigm of ecosystem service tradeoff needed to integrate the objective tradeoff law and management tradeoff decision, to make the objective tradeoff law researches more application oriented. In terms of the exploration of objective laws, we should deepen the research on the driving mechanism that forms the law of tradeoffs, carry out the research on the coupling of multiple space-time scales, and clarify the robustness of the law of tradeoffs. In the aspect of tradeoff decision management, it should attach importance to the setting of decision-making criteria, strengthen the participation of multiple parties in decision-making, and deeply explore the relationship between ecosystem services and human well-being, so as to make the tradeoff criteria more close to the real needs of regional management and improve the feasibility of decision-making results. In the aspect of empirical research, the research of trade-offs decision paid insufficient attention to Chinese protected areas. In the future, we should try to fill the research gap of the protected areas while continuing to promote the study of urban areas, to serve the urgent tradeoff management needs of the protected areas in China.

Key Words: ecosystem services; trade-offs; social-ecological system management; decision optimization

生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统得到的惠益,是人类社会生存和发展的基础^[1],其供应对于保障人类福祉有重要的意义^[2]。生态系统服务被认为是连接自然与社会生态系统的桥梁,且相较弹性理论^[3]和 SES 分析框架^[4]等其他社会-生态系统分析工具具有易量化、易空间表达的优势,因此在社会-生态系统的分析和管理中得到了广泛的应用。

在生态系统组分-过程-功能-服务-福祉的生态系统服务级联模型中^[5],形成不同服务的生态过程可能存在对生态组分和自然资源的竞争利用关系^[6],致使某些生态系统服务难以同时实现最大化,即生态系统服务间存在此消彼长的权衡关系。类似的,当形成不同服务的生态过程对生态系统组分和自然资源的利用呈互利或不相关关系时,生态系统服务间存在协同关系或无关联。

对于不同的需求,同一生态系统服务和人类福祉的关系可以发生巨大改变。因此,生态系统服务间的权衡/协同关系往往对应着服务消费者利益或社会-生态系统管理目标间的冲突/共赢关系。管理者需要通过决策进行合理的干预和支配,调节或利用生态系统服务间的关系,化冲突为共赢,可持续地实现生态系统服务的最大效用,全面提升人类福祉。

正确理解生态系统服务权衡的内涵和作用机制,优化生态系统服务间的权衡关系,协调生态系统管理的多元目标,是社会-生态系统可持续发展的主要挑战。随着研究的不断推进,生态系统服务权衡从对客观规律的简单认识逐渐拓展成为辅助社会-生态系统决策的工具^[7-8]，“权衡”的语义和涵义也变得复杂多样,常给初入这一领域的研究者带来困惑,难以理清繁多的研究方法和研究思路。为此,本文整理了生态系统服务权衡的内涵和分类,将生态系统权衡研究二分为客观权衡规律和管理权衡决策两大类,并对两类权衡研究的国内外进展进行了系统梳理和评述。在客观权衡规律方面,主要包括生态系统服务供与需间权衡、生态系统服务供或需间权衡两部分;在管理权衡决策方面,主要包括生态系统服务管理权衡决策的准则确定和求解思路两部分。并最后进行了总体评价和研究展望,以期可以为生态系统服务权衡研究提供参考依据。

1 生态系统服务权衡的内涵与分类

在生态系统管理和生态系统服务的相关研究中,“权衡”一词被广泛的提及,且内涵和分类不一。最早,千年生态系统评估 MA (Millennium Ecosystem Assessment) 根据生态过程的空间外部性、时间滞后性和效果可逆性,认为权衡具有小尺度或大尺度、长期或短期的属性、可逆或不可逆的 3 类属性,将三类属性组合得到 8 种生态系统服务之间的权衡关系^[9]。其后,TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) 又根据权衡的内容,将权衡分为 4 种,分别是考虑成本和收益在空间上分离的权衡、考虑成本和收益在时间上滞后的权衡、考虑成本和收益在利益相关者之间分配的权衡、考虑目标生态系统服务选择的权衡。相较 MA,TEEB 将“权衡”定义为管理者决策中的“取舍”,强调了生态系统服务的经济价值,将权衡关系的研究语境从自然生态系统扩展到了社会-生态系统,权衡关系的维度也在时间维度和空间维度的基础上增加了利益相关者的维度。

Mouchet^[10]将上述两种分类框架融合在了一起,提出了综合供给和需求的 3 种权衡关系类型:“供给-供给类”,指不同生态系统服务供给之间此消彼长的关系;“供给-需求类”,指生态系统服务供给和需求之间在空间或时间上的错位和不匹配;“需求-需求类”,指由于需求差异性使得各利益相关方难以同时得到充分满足,需要进行公平的分配和仲裁。Mouchet 的观点得到了学界广泛的认可,但随着研究进一步深入,有学者发现“此消彼长”的关系不仅存在于服务的供给中,也存在于服务的需求和消费中。“需求-需求类”权衡关系的内涵被进一步丰富,除了需要考虑利益相关方维度,还需要考虑时间和空间维度。

参考上述代表性研究对“权衡”的分类和内涵阐释,本文将生态系统服务权衡概括为两类,一类是客观权衡规律,一类是管理权衡决策(图 1)。客观权衡规律又可分为 2 类,分别为服务供与需间权衡(供给-需求类)、服务供或需间权衡(供给-供给类、需求-需求类)。前者针对同项生态系统服务供需间的权衡;后者针对不同项生态系统服务的权衡展开论述,且“供给-供给类”和“需求-需求类”权衡在研究内容 and 研究方法上存在诸多共性,可以一同进行讨论;权衡决策的对象有 4 类,分别是生态系统服务的类型、服务空间尺度的大或小、服务时间尺度的长或短、需求得到满足的受益者类型。客观权衡源自生态系统服务供给的多重性^[11],是一种生态系统的客观规律;而权衡决策则源自人类对生态系统服务的选择偏好^[12],是对生态系统服务间关系的一种综合把握。在社会-生态系统中,管理权衡决策是为了优化客观的权衡规律,从而可持续的提升人类福祉,两者以生态系统服务变化的驱动机制为纽带联结在一起,探索权衡规律并阐明驱动机制是为了更好的实

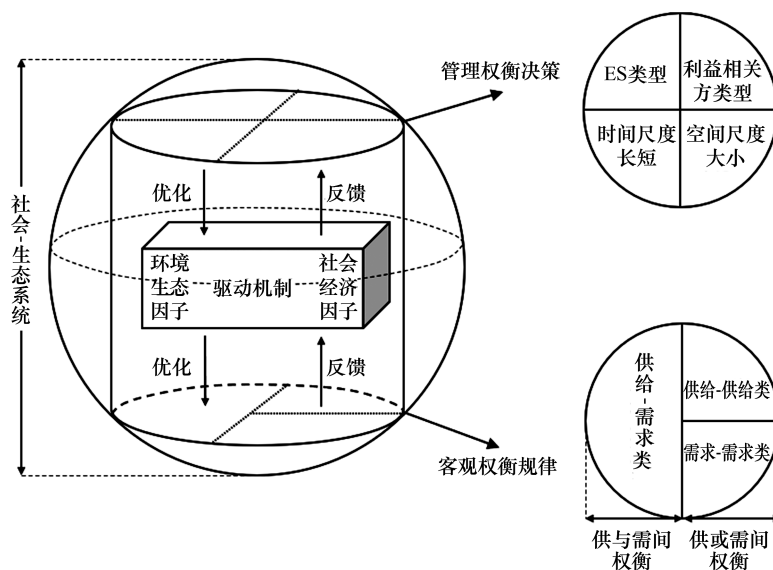


图 1 生态系统服务权衡分类

Fig.1 Classification of tradeoff of ecosystem services

现权衡优化管理。

2 生态系统服务客观权衡规律

2.1 生态系统服务供给或需求权衡研究

生态系统服务间的权衡关系研究主要围绕以下两类问题(图2):其一,识别生态系统服务之间的权衡/协同关系,分析权衡/协同关系的时空特征、识别生态系统服务簇。研究对象既可以是两两成对(pairwise)的生态系统服务,也可以是多项成组的生态系统服务。其二,识别出形成权衡/协同规律的驱动因子和驱动机制。

2.1.1 生态系统服务间权衡/协同关系识别

生态系统服务间的权衡具有时空尺度依赖性和非线性特征,这主要由于生态系统的功能具有时空尺度特征。时间尺度上,比如 Schroder 等^[13]在美国国家森林的研究中,发现森林火险管理(伐木)与猫头鹰栖息地保护、水质调节存在着短期权衡、长期协同的关系。空间尺度上,比如余玉洋^[14]等在秦巴山区的研究中,发现虽然生态系统服务间的关系在大、中、小尺度上都一致表现为权衡/协同,但权衡/协同的强度却随尺度增大而增强。因此在进行权衡关系识别时,应注意时空尺度的界定,然而目前许多研究对分析结果的尺度依赖性的考虑不足,对权衡规律的稳健性避而不谈,仅有少数研究分尺度进行权衡关系分析或对结果的不确定性进行了分析,并且多集中在空间尺度上^[14-17],这无益于区域间和代际间可持续性 & 公平性的维护。

(1) 成对生态系统服务间权衡关系识别

成对生态系统服务之间权衡关系的研究多数是纯定量的,运用模型计算得到生态系统服务的生物物理量,再定量地分析各服务间的关联性,主要有静态空间相关性、动态空间相关性和二维生产可能性边界法(PPF)^[18](表1)。但也有部分研究是定量和定性相结合的,运用 PPGIS 等参与式评估的方法评价生态系统服务的供给/需求水平,然后再进行服务间关联性的分析^[38-40]。

静态的空间相关性以格网为单位,对某单一时间阶段的 ES_1 和 ES_2 进行空间相关性统计计算,时间长度通常为一年,但也有学者取多年的时间周期,用平均静态空间相关系数来体现长周期内两种服务间的相关关系^[41-42]。然而有学者认为静态的空间相关性忽略了景观历史的发展过程,“现状”是由生态系统服务之间长期的权衡和协同作用下的“结果”,因此静态空间相关法得出的“权衡/协同”可能仅仅只能说明服务之间的关系并不是随机独立的,不能准确地表明生态系统服务之间相互作用的过程和关系,并基于这种批判提出应分析动态空间相关性^[43-44]。在 Tomscha^[44]的研究中,两个时间点(1949 年和 2006 年)同样运用静态空间相关性方法得到的结果仅略有不同,但都与动态空间相关性方法得到的结果大不相同,甚至生态系统服务间的协同和权衡关系都发生反转。可见,权衡的“结果”和“过程”可以存在很大的出入。

生产可能性边界最早在福利经济学中,是为了帮助具有资源竞争资源关系的两项产品实现资源高效率利用而绘制的曲线。生态系统服务的形成也涉及到自然资源和土地利用的竞争关系,基于这样的考虑,woosink^[45]在 2007 年首次将 PPF 方法纳入生态系统服务的研究中,用于研究农户提供非供给类的生态系统服务的受偿意愿。随后,Lester^[46]打破了传统 PPF 的拟凹函数假设,认为生态系统服务之间的权衡关系与经济学中产品生产对资源的竞争关系不完全相同,ES-PPF 的形状可以是多种形态的拟凸曲线,并针对不同的形态进行了讨论。

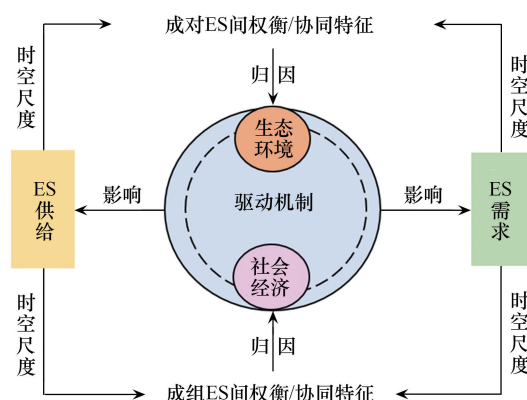


图2 生态系统服务间供给或需求权衡的研究内容

Fig.2 Research contents of trade-offs between ecosystem services supply or demand

表 1 成对生态系统服务间权衡/协同关系的主要研究方法

Table 1 Research methods for the trade-off relationship between pairwise ecosystem services				
方法类型 Method type		方法描述 Method description		特点及适用性 Characteristics and applicability
静态空间相关法 Spatial correlations method	相关 分析法	Pearson 相关系数	ES1 和 ES2 的分布是正态的	关注权衡结果,适用于稳定地区
		Spearman 秩 相关系数	ES1 和 ES2 的分布是非正态的	
		袋状图法	简明直观 ^[19-20]	
	静态权衡 协同度法	均方根 偏差	用极值标准化处理过的多种生态系统服务间的 RMSD 来计算权衡度,将单(多)对服务的 RMSD 的累积求和就可以量化某项管理措施形成的生态系统权衡程度 ^[21-25]	
		合力向量	借用物理学中的机械平衡模型,将极值标准化处理过的生态系统服务用"力向量"形式表达,其"合力"即为权衡程度 ^[26]	
		欧氏距离	运用不同模拟情景到生产可能性边界的欧式距离作为定量衡量生态系统服务的权衡度 ^[27]	
	叠加分析法		识别出高值-高值区(win-win)、低值-低值区(lose-lose)和高值-低值区(win-lose),分别量化三种状态下的位置占总数的比例,判断研究区内主导的是权衡关系还是协同关系 ^[28]	
动态空间相关性法 Temporal correlations method	贝叶斯网络法		将生态系统抽象成有节点构成的有向无环图(DAG),并依据实际核算数值、专家经验或文献调研得到条件概率表(CPTs),再利用联合概率表求得服务间的相关系数,可以反映评估结果的不确定性 ^[29-30]	
		权衡协同度	建立在线性拟合的假设下,多以研究区整体为单元计算。可以通过长时间序列的核算比较不同发展和管理阶段下,生态系统服务间权衡和协同关系变化趋势 ^[31-33]	适用于快速变化地区、新政策试行区和具有基线监测的地区
二维生产可能性边界法 Two-dimension production frontiers method	生态系统服务的二维生产可能性边界		根据模拟、核算结果绘制 ES-PPF,曲线斜率代表生态系统服务供给的边际成本;根据服务消费者的需求偏好绘制效用曲线或消费契约曲线;寻找高效率的 ES 供给组合,并尽量在边际机会成本小的地区实施优化目标 ^[34-35]	可以讨论不同生态系统服务利益相关者对于景观和资源配置的偏好,还可以提出资源高效配置的改进意见 ^[36] 。但对情景设置和样本代表性要求较高,否则造成 ES-PPF 偏离真实情况 ^[37]

(2)成组生态系统服务间权衡关系识别

识别多项生态系统服务间的权衡/协同关系主要有三种方法,即主成分分析法、因子分析法等和多维生产可能性边界法。主成分分析法或因于分析法的结果中主成分/因子载荷的正负和大小可以用来衡量生态系统服务之间的权衡或协同关系^[47-49]。多维生产可能性边界与二维生产可能性边界的方法原理一致,其中代表性的案例是 Ruijs^[50]运用多维生产可能性边界法模拟了欧洲 18 个国家的食物供给、文化服务、碳封存和生物多样性的 ES-PPF,并根据边际机会成本给出了生态系统服务的管理建议。

基于多组生态系统服务间权衡/协同关系的研究,“生态系统服务簇”这一概念被提出,它最初被定义为一组在时间或空间上反复地共同出现的生态系统服务^[51],即空间上具有相似生态系统服务构成的组合,由此可见这一概念最早仅考虑生态系统服务的供给,即“供给簇”。后有学者将这一概念从供给拓展到需求,将人们需求的一组互相关联的生态系统服务称为“需求簇”,比美国内华达山脉的调查表明,农民的“需求簇”多来自于农业生产系统,而游客的“需求簇”则多来自森林生态系统^[52]。近年还有学者基于供需匹配特征提出了

“供给-需求簇”^[53],或基于供给、需求和流动的特征提出了“供给-流动-需求簇”^[20]。可见相较早期对服务供给研究的侧重,如今的研究已呈现向服务需求研究倾斜的趋势。

识别服务簇可以有效提高管理决策的针对性和工作效率,根据各服务簇的权衡特征有的放矢,降低管理成本^[54]。生态系统服务簇通常采用系数矩阵图、雷达图、花朵图等可视化方法表示。服务簇的识别主要有两种方法,第一种方法较为基础,是直接对研究区的单元格网进行聚类分析,得到服务簇^[51, 55];第二种方法是在主成分分析或因子分析之后进行聚类分析得到服务簇,这种方法排除了生态系统服务间重复供给的情况,增强了聚类结果的稳健型^[56-57]。比如 Turner^[58]在对丹麦的 11 项生态系统服务进行 PCA 后得到 4 个主成分,随后又根据空间上每个格网单元的四个主成分得分进行了聚类分析,得到 6 种生态系统服务簇。

2.1.2 生态系统服务间权衡关系驱动力分析

驱动力分析是生态系统权衡研究的薄弱环节,现有研究多侧重权衡/协同规律的识别,但对规律背后的驱动因子和驱动机制的关注则相对不足。驱动因子大体上可分为环境生态因子和社会经济因子,环境生态因子主要包括地貌、土壤、植被、水文和气候等,社会经济因子主要包括管理政策、受访者特征(如距离保护地的距离、收入水平、性别、身份、受教育水平等)、区域发展水平(人口密度、农业生产条件、产业经济指标等)。通常而言,环境生态因子用于探究“供给-供给”类权衡/协同关系成因,社会经济因子用于探究“需求-需求”类权衡/协同关系成因,但若涉及受人类活动影响较强的生态系统服务,“供给-供给”类权衡/协同关系成因也需要将社会经济因子纳入考虑^[59-62]。驱动因子的分析方法主要有对应分析法、多重对应分析法、回归分析法、机器学习法等。其中,回归分析使用最多,常用的二元逻辑回归^[63]、多类逻辑回归(MNL)、随机参数逻辑回归(RPL)^[64]、最小二乘回归(OLS)^[65]等等都有应用。冗余分析(RDA)^[66]和典范对应分析(CCA)是两种最常用的对应分析方法,在驱动因子的研究中得到了十分广泛的应用。多重对应分析(MCA)专门用于处理名义数据或有序分类数据,因此相较其他方法更适合于分析管理措施和保护策略形成的驱动力^[67],比如 García-Nieto 等^[68]利用 MCA 分析保护策略(国家公园、自然保护区、未保护区)对生态系统服务供给-供给权衡的影响。近年来机器学习法也得到了一定的应用,比如 Schirpke 等^[20]运用随机森林模型,用 25% 的随机样本模拟各项驱动因子与生态系统服务簇的聚类隶属度间的关系,训练结果较好地服务于服务簇特征的预测。

驱动机制方面主要还在沿用生态系统服务通用的组分-过程-服务-人类福祉-人为活动级联模型^[5, 69]或 PSR 模型^[70],其核心可被拆分为“组分-过程-服务”“服务-人类福祉-人为活动”和“人为活动-组分-过程”三个关键的因果链条,围绕权衡规律驱动机制的讨论也主要集中在这三个链条上。针对第一个链条, Bennet^[71]等认为权衡的形成有两类主要机制,一类是以驱动因子为媒介产生的服务与服务间的间接关系,另一类是服务间的直接关系,这两类主要原因还可以交叉形成六种组合机制;王志芳^[72]运用因果循环图剖析了服务与服务间、驱动因子与服务间、驱动因子与驱动因子间的相互关系。针对第二个链条,行为理论成为了可行的依据,运用结构方程或参与式评估可建立起从服务到行为的桥梁^[73-74]。针对第三个链条, Altman 等^[75]提出了人类行为-影响强度-生态系统服务的连乘关系矩阵,半定量地反映了不同服务对驱动因子的响应机制;闵勇^[76]利用布尔网络半定量地模拟了人为活动影响对生态系统服务的潜在影响。整体来看,生态系统服务权衡规律的驱动机制仍然处于理论框架的初步搭建阶段,尚没有成型的研究框架和体系化的研究方法,致使客观权衡规律研究的指向模糊、与管理权衡决策脱节,不能够很好地服务于优化策略的提出或优化情景的设计。

2.2 生态系统服务供给与需求权衡研究

2.2.1 供需匹配的维度

生态系统服务供给与需求的权衡研究实质上是对供给和需求的数量关系进行比较匹配,而生态系统服务的供给可以分为潜在供给^[77]与实际供给^[78-80],生态系统服务的需求也可以分为潜在需求^[81]与实现需求^[82],因此在进行供需数量关系的研究时,应当注意概念的界定。生态系统服务供需之间的错配具有多维度的特性(图 3),既可以是空间维度、也可以是时间维度、还可以是利益相关者维度^[83]。

多数供需匹配的研究集中在空间维度上,与生态系统服务流动研究紧密结合。在服务供需的空间关系方

面, Costanza 等^[84]将服务分为全球非邻近、局部邻近、流动方向性、原位性和使用者迁移性; Fisher 等再次基础上^[85]提出了服务产生区和服务受益区, 将全球非邻近、局部邻近合并为全方向, 并将流动方向性按照是否依赖重力细分为 2 类; Serna-Chavez 等^[86]在服务产生区(P)和受益区(B)的基础上提出了服务流动范围区(F), 并利用 B、P、F 的相离、相交和包含关系进行服务的描述和分类。我国学者马琳^[87]在 Serna-Chavez 的基础上, 强调地形和方向性的影响, 将供需的空间关系分为 6 种。

服务产生区、受益区和流动区之间复杂多样的空间关系直接影响到供需匹配研究的空间尺度选择。供需匹配服务的研究区应当尽量将服务的产生区、需求区和流动区都包含在内, 其结果才能真正促进服务在空间上的均衡配置, 实现可持续地供给和利用。因此, 在目前的供需匹配研究中, 比较少涉及诸如防风固沙、水源涵养等难以量化和测度流动的服务, 较多的涉及使用者迁移服务或坡地土壤保持、水质净化等流动范围较小的服务, 或是食物供给、能源供给、原材料供给、水源供给等虽流动范围广但流量和流向都易量化的服务。

在时间维度上的供需匹配研究相对较少。针对时间维度, Mehring^[88]强调生态系统服务供需错配研究不仅要考虑自然生态系统的动态, 还要考虑社会经济系统的动态。比如即使一年当中生态系统服务的供给(鱼类生物量)和需求(渔民维持生计的捕鱼量)在总体上是匹配的, 但是由于政策、天气等因素的限制, 渔民们的捕鱼量往往不能得到满足, 因此供需仍然是不匹配的^[89]。在利益相关者维度上, 不同利益相关者对服务的需求存在差异, 这通常与居住地、身份、教育水平等因素有关^[52, 90-91], 在环境冲突中由于环境公平的缺位, 总会有部分利益相关者成为“输家”, 其需求不能得到满足。比如 Stosch^[36]利用 ES-PPF 就同一流域内四种利益相关者对于农业生产强度对个人效用的影响的感知进行了调查, 展示了不同的农业生产强度下, 在利益相关者维度上产生的不同性质和强度的权衡。

2.2.2 绝对匹配与相对匹配

绝对匹配是将生态系统服务供给和需求的真实值进行匹配分析, 适用于供给和需求可以统一量纲的服务类型。衡量绝对匹配度常用指标是“供需比^[92]”和“供给率^[93]/供给比^[87]”, 前者用于衡量实际供给(实现需求)和总需求之间的数量关系, 即判断是否满足需求; 后者用于衡量实际供给和潜在供给之间的数量关系, 即是否存在“过载”(overuse)^[80], 匹配状态是否可持续。供给方面, 通常运用生物物理过程模型(如计算 NPP)来估算潜在供给, 用行业管理数据(如林业采伐量)估算实际供给, 但由于行业管理数据的获取难度, 许多相关研究并没有很好区分潜在供给和实际供给, 改用潜在供给和总需求计算供需匹配情况。需求的表征方式主要有服务消费量和脆弱风险性两种, 前者通常利用均值类行业标准计算(比如人均用水定额、人均碳排放量^[94]等), 后者通常利用阈值类行业标准计算(如水土流失风险标准^[95]、空气质量标准^[96]、水质标准等)。

相对匹配则是将服务供给和服务需求的相对水平进行匹配分析, 供给和需求可以是量纲不同的值, 甚至是无量纲的排序等级, 适用于所有服务类型。衡量相对匹配的方法主要有空间冷热点匹配、数量排序匹配和经验供需矩阵 3 种(表 2), 但 3 种方法都不同程度的体现出“自给自足”的思想, 欠缺了对系统内外物质交换和流动的考量, 这也是相对匹配法的主要缺陷。供给方面, 通常采用自然生态指标或受益者感知(如景观美学价值高低、感受到服务供给程度等)来表征。需求方面, 通常采用受益者的感知(如偏好、支付意愿、受偿意

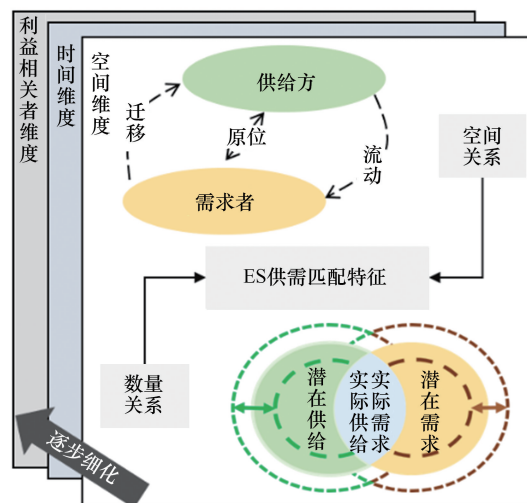


图 3 生态系统服务供给与需求权衡的研究内容

Fig.3 Research content of ecosystem service supply and demand tradeoff

愿等)、受益者的直接利用情况(如服务设施密度、到访人次等)或社会经济指标(人口密度、建筑密度、经济水平等)来表征。

表 2 生态系统服务供需相对匹配方法
Table 2 Research method for relative matching of supply and demand of ecosystem services

方法类型 Method type	方法特点 Characteristic	分析步骤及结果形式 Analytical procedure and results form
空间冷热点匹配 Spatial hot-cold spots match ^[97-100]	旨在识别供需(不)匹配的大致区域和范围,大致推断供需间流动的方向和路径	识别出空间上服务供给和需求的高值区和低值区,再将其进行匹配,从而识别出“高供给-高需求”“高供给-低需求”“低供给-高需求”“低供给-低需求”的区域
数量排序匹配 Quantity rank match ^[101-102]	侧重不同行政单元或景观类型间的横向对比	将各项服务各自标准化处理后,分别绘制各单元的服务供给和服务需求的玫瑰图或雷达图,无需进行空间化表达
经验供需矩阵 Empirical matrix match ^[82, 92, 103-104]	简单快速地基于土地利用摸清研究区内每个单元格网上的供需匹配情况	基于专家经验和已有研究建立不同土地利用类型的生态系统服务供给矩阵、需求矩阵和供需平衡关系矩阵

3 生态系统服务管理权衡决策

由于生态系统服务和人类福祉之间的紧密联系,对生态系统服务的管理权衡实际是对社会-生态系统多重管理目标的权衡,权衡决策过程从社会-生态系统的多功能性管理出发,调节或利用生态系统服务间的客观权衡规律,实现系统效用最大化。在多种主流决策辅助方法中,多准则决策(multi-criteria decision making analysis, MCDA)的研究理念与生态系统服务管理权衡决策高度一致^[105-106],因为 MCDA 可以整合多角度多层次的标准^[107],专长于处理冲突目标下的管理问题,很适用于社会-生态系统复杂的研究背景。MCDA 将多种子决策准则赋权后进行整合,由此得到一个综合决策准则,并以此为依据进行优化管理方案的演算和选择。这一过程对应到生态系统服务管理权衡决策中,就是将社会-生态系统的多重管理目标进行合理赋权并整合成一个管理权衡决策准则,在此基础上结合研究条件和具体需求选择合适的求解思路,最终制定出生态系统服务的优化管理方案。基于以上考虑,本文围绕“如何确定权衡决策准则”和“有哪些优化方案求解思路”这两个问题,对生态系统服务管理权衡决策的相关进展进行梳理和总结。

3.1 管理权衡决策的准则确定

权衡决策准则对管理方案的选择起到决定性的作用,其确定过程本应慎重而缜密,却被许多研究者随意忽略或过度简化,为了提升管理权衡决策的科学性,深入探讨决策准则的确定方法十分必要。在生态系统服务管理中,生态系统服务类型因同其他三种生态系统服务管理对象具有较为明确的对应关系,而成为确定管理权衡决策准则的重要抓手。当可利用的资源有限时,优先级判断是管理的核心^[108],是对各管理目标赋权的重要依据,因此判断管理目标所对应的生态系统服务类型的优先级就是确定权衡决策准则的核心。对于没有特定管理目标的社会-生态系统,各项生态系统服务的优先级默认均等,这类系统的理想状态是同时实现多种生态系统服务高水平的总效用和低水平的总权衡,除此之外无论是高效用、高权衡,还是低效用、低权衡都是不理想的管理状态^[25],其管理权衡决策准则应着重考虑生态系统服务权衡度和供需匹配度等指向资源可持续利用的指标。然而实际上,社会-生态系统大多具有特定的管理目标,这种情况下,判断生态系统服务类型的优先级是进行权衡决策的必需项。

生态系统服务类型优先级判断的本质是进行不同生态系统服务类型重要性的横向对比,根据评价角度的不同,生态系统服务的重要性可分为供给重要性、需求重要性和供需综合重要性,因此在相关研究中,“优先”这一语义也有多样的表述形式,如关键的(key)、重要的(important/critical)、首要的(priority)、偏好的

(preference)等等。值得注意的是,许多研究孤立地基于供给重要性或需求重要性确定生态系统服务的优先级,这类研究虽可为决策准则的确定提供多视角的洞见,但可能难以全面反映社会-生态系统的真实管控需求,因为低供给重要性的生态系统服务可能具有高需求重要性,反之亦然。举例来说,喀斯特地貌区的水土流失严重,其水土保持服务虽然供给量低、供给重要性低,但流失风险高、需求重要性高,因此其优先级并不低。生态系统服务类型优先级判断有客观和主观两类方法。

客观的生态系统服务类型优先级判断依赖研究者的理性分析,根据社会-生态系统的自然和社会特征进行客观判断。供给重要性方面,难点在于各生态系统服务的量纲不同,可利用货币化手段使不同生态系统服务横向可比,再以经济价值为依据衡量供给重要性^[109]。需求重要性方面,常根据社会生态系统的敏感性和脆弱性判断生态风险,水土保持服务、授粉服务、洪涝调节服务等都可以采用此方法^[110]。若将供给重要性和需求重要性结合,即可得到研究区真实的生态系统服务优先级,中国生态功能区划便是这一方法的代表性案例。

主观的生态系统服务类型优先级判断依赖利益相关者的感性认识,根据利益相关者的经验和感知进行主观判断。不同身份利益相关者的需求出发点多不相同,其感知的尺度和角度也随之变化^[111-112],针对社会-生态系统的复杂性,主观的生态系统服务优先级判断推崇和鼓励多方利益相关者的共同参与^[90],以保证生态系统服务优先级和管理目标设置的科学性。陈述偏好法是进行利益相关者经验和感知调查的主要手段,层次分析法等其他定量工具也有一定辅助应用^[113]。介于“优先”多样的解读方式,为避免歧义,研究者应注意对受访利益相关者的询问方式,阐明是需求重要性(如最需改善的)、供给重要性(如质量最好的)还是综合重要性,避免有偏倚的解释或引导。陈述偏好法的类型多样,服务优先级调查的具体方式也因研究条件和研究区域而异。最基础的方法是进行无排序的选择,通过被选比例评价生态系统服务的重要性^[100]。再进一步的是让受访者进行有限个数的有排序选择,其效果类似于李克特赋分。更进一步的是为了获得更加细致、差异化的强制排序,让受访者进行更深入的思考和取舍,比如有有限砝码分配^[114]和 Q 方法等^[115-120]。

3.2 管理权衡决策的求解思路

生态系统服务管理权衡决策大致可分为两种思路,一种是基于现状诊断的管理权衡决策,一种是基于未来场景模拟的管理权衡决策,基于未来场景模拟的管理权衡决策又可分为基于未来假想行动模拟的和基于理想结果模拟的。无论是哪种研究思路,生态系统服务的管理权衡决策都关注生态系统服务间的客观权衡规律,其区别在于其聚焦的尺度有所不同。大体上,基于理想结果模拟的思路仅关注大尺度上研究区整体的生态系统服务客观权衡规律,默认内部各种用地类型的多功能性不变,依靠各用地类型的面积转移实现管理目标;基于现状诊断的思路和基于假想行动模拟的思路则更关注小尺度上某种用地类型或区域单元的生态系统服务客观权衡规律,将小单元或特定地类的多功能性视作可调控的变量,通过制定具体的管理措施及实施空间,使土地的多功能性得到高效地发挥或优化。

3.2.1 基于现状诊断的管理权衡决策

基于现状诊断的管理权衡决策不涉及情景模拟,仅基于现实的社会-生态系统的生态系统服务特征进行优化决策。研究者通过分析生态系统服务的客观权衡规律,对双赢(win-win)、双损(lose-lose)、权衡(lose-win)的区域进行定位并探讨其成因,进而寻找最均衡、高效的优化管理措施和实施空间。一种思路是在权衡关系中区分“强权衡”和“弱权衡”,并以降低权衡度为原则制定管理方案^[121-123];另一种思路是寻找“win-win exception”,即寻找理论上本应“权衡”却实现“协同”的特例点,通过分析特例点的形成原因来提出社会-生态系统的优化方向^[49]。

基于现状诊断的管理权衡决策的一项典型应用,是服务于保护地的外围边界划定和保护地内部的功能分区,即将管理措施限定为“保护”或“恢复”,最大限度地优化首选的支持服务和调节服务,基于生态系统服务的客观权衡规律去寻找双赢或低权衡的地区,并结合经济预算建立高效的自然保护网络^[124-127]。

3.2.2 基于未来情景模拟的管理权衡决策

这种研究思路通过模拟替代情景来描述具有不确定性的未来^[128]。在基于假想行动的情景模拟研究中,

研究者预设若干替代情景,每个替代情景都有明确的管理行动,包含着明确的管理措施和实施空间,每个替代场景都代表着一种管理方案,研究者分别模拟各替代情景中生态系统服务的情况,并结合决策准则挑选出较优的管理方案。而在基于理想结果的情景模拟研究中,研究者仅预设一种替代情景,这一替代情景具有明确的管理结果,代表着一系列可能的管理方案,研究者需要反向演算出这一系列可能的管理方案,并结合决策准则和可行性分析从中挑选较优的结果。两者分别代表着 MCDA 的两种类型,即多属性决策(MADA)和多目标决策(MODA),基于假想行动的情景模拟属于 MADA,基于理想结果的情景模拟属于 MODA。

基于假想行动的情景模拟研究中,结合管理目标和研究条件,科学地进行替代情景的预设至关重要,可以从生态系统、景观和政策三个层面入手。①从生态系统层面入手:改变森林^[129-130]、农田^[131]等生态系统的种植结构和管理方法,通常需要利用实验观测数据调整预测模型的参数。对此,李双成等^[132]总结归纳了 5 种生态系统服务的优化措施,可作为替代情景设定时的参考。②从政策层面入手:模拟退耕还草、植树造林、生态补偿等环境政策的影响,但政策的有效性具有很高的不确定性,模拟难度较大^[42, 133]。③从景观层面入手:改变不同景观分区的管理模式和景观组分,比如保护区划变更^[134]、城乡用地变化^[135-136]、景观连通度增加^[137],通过元胞自动机^[138]、马尔科夫链、系统动力学等方法模拟。

基于理想结果的情景模拟研究中,理想的管理结果通常以约束条件的形式表达,研究者运用线性规划或启发式算法(如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、蚁群算法等)对各用地类型进行数量规划,寻找理论上的满意解,再利用土地利用模型实现用地数量的空间化表达,探索实现帕累托最优的条件和方案。比如,Accatino^[139]为了探索提升畜牧生产的同时不牺牲其他服务的优化方案,设下了畜牧业增产且木材、农作物不减产的约束条件,对法国全域范围内的土地利用格局进行了重新规划。又如马冰莹等^[140]设置了“生态保护”“经济发展”“统筹兼顾”等理想的管理结果,并根据四种结果提出了相应的约束条件,从而对京津冀城市群的土地利用进行了优化配置。

这两种思路各有千秋。基于假想行动进行情景模拟得到的管理方案可行性较高,但由于研究者思路和想象力的局限性,预设替代情景的数量有限,研究结果大概率为次优方案。基于理想结果进行情景模拟较易获得最优方案,然而受限于社会、自然和文化的因素,最优方案的可行性低,使得许多研究退而求其次地选用次优解推算出的次优方案,研究结果虽同为次优方案却更具启发性。但整体而言,这两种情景模拟过程中管理政策、社会-生态系统结构和生态系统服务之间的复杂联系仍缺乏探讨,模型参数设置的科学性不足,且结果缺乏验证,很多研究的理论意义仍强于现实意义。

4 研究展望

在理论和方法创新方面,应基于现有的生态系统服务级联模型提出生态系统服务权衡的研究范式,细化引入生态系统服务权衡分析工具,整合客观权衡规律和管理权衡决策,提升客观权衡规律研究的应用指向。为此,在客观规律探索问题上,要深化对形成权衡规律的驱动机制的研究,探索管理政策、社会-生态系统结构和生态系统服务变化之间的复杂联系和反馈、响应机制。并针对生态系统服务的非线性特征,开展多时空尺度耦合研究,明确权衡规律的稳健性。在管理权衡决策问题上,应重视决策标准的设置,加强多方参与决策,深入探讨生态系统服务和人类福祉的联系,使权衡准则更加贴近区域管理的真正需求,提升决策结果的可行性。虽然在 WOS 上以“ecosystem services tradeoff”为主题进行搜索,中国地区的发文数量居世界领先水平,但整体而言,国内学者在实证研究方面更显优势,在研究框架构建和方法模型创新方面却略落后于国际,这应当是未来一段时期的研究要点。

在实证研究方面,国内实证研究的研究区分布略显不均,尤其是主观权衡决策的研究主要集中于城乡交错带或大城市群等人为活动压力较大、经济发展需求较高的地区,在自然保护地等高生态保护需求的地区相对欠缺。我国自然保护地人口稠密,保护地内及其周边地区所构成的社会-生态系统同样面临着多发展目标相互矛盾、各利益相关方的生态系统服务需求难以兼顾、需要进行权衡决策的问题。因此,国内学者在后续权

衡决策研究中不应将目光局限于城乡交错带或大城市群,可尝试将目光转移,填补我国对自然保护地多目标管理的空缺,细化考量不同类型保护地不同管理目标下如何利用生态系统服务权衡管理实现生态保护和社区发展的协同提升问题。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] Folke C. Resilience (Republished). *Ecology and Society*, 2016, 21(4): 44.
- [4] Ostrom E. A General framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [5] Potschin-Young M, Haines-Young R, Görg C, Heink U, Jax K, Schleyer C. Understanding the role of conceptual frameworks: reading the ecosystem service cascade. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 428-440.
- [6] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [7] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [8] 傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 新时期地理学的特征与任务. *地理科学*, 2015, 35(8): 939-945.
- [9] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, Cumming G S, Cork S J, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28.
- [10] Mouchet M A, Lamarque P, Martín-López B, Crouzat E, Gos P, Byczek C, Lavorel S. An interdisciplinary methodological guide for quantifying associations between ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 298-308.
- [11] 李双成, 谢爱丽, 吕春艳, 郭旭东. 土地生态系统服务研究进展及趋势展望. *中国土地科学*, 2018, 32(12): 82-89.
- [12] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [13] Schroder S A, Tóth S F, Deal R L, Ettl G J. Multi-objective optimization to evaluate tradeoffs among forest ecosystem services following fire hazard reduction in the Deschutes National Forest, USA. *Ecosystem Services*, 2016, 22: 328-347.
- [14] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 马新萍, 张城. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达. *生态学报*, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [15] Bai Y, Chen Y Y, Alatalo J M, Yang Z Q, Jiang B. Scale effects on the relationships between land characteristics and ecosystem services-a case study in Taihu Lake Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137083.
- [16] 张宇硕, 吴殿廷. 京津冀地区生态系统服务权衡的多尺度特征与影响因素解析. *地域研究与开发*, 2019, 38(3): 141-147.
- [17] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 李艳红. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析. *地理学报*, 2020, 75(5): 975-988.
- [18] Vallet A, Locatelli B, Levrel H, Wunder S, Seppelt R, Scholes R J, Oszwald J. Relationships between ecosystem services: comparing methods for assessing tradeoffs and synergies. *Ecological Economics*, 2018, 150: 96-106.
- [19] Jopke C, Kreyling J, Maes J, Koellner T. Interactions among ecosystem services across Europe: bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 46-52.
- [20] Schirpke U, Candiago S, Egarter Vigl L, Jager H, Labadini A, Marsoner T, Meisch C, Tasser E, Tapeiner U. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 928-941.
- [21] Langner A, Irauschek F, Perez S, Pardos M, Zlatanov T, Öhman K, Nordström E M, Lexer M J. Value-based ecosystem service trade-offs in multi-objective management in European mountain forests. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 245-257.
- [22] Lu N, Fu B J, Jin T T, Chang R Y. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708.
- [23] 吴炜, 项文化, 勾蒙蒙, 徐传洪, 欧阳帅, 方晰. 中亚热带 3 种次生林生态系统服务权衡与协同. *森林与环境学报*, 2019, 39(3): 256-264.
- [24] Qin K Y, Li J, Yang X N. Trade-off and Synergy among ecosystem services in the Guanzhong-Tianshui economic region of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(11): 14094-14113.
- [25] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [26] Zhang Y N, Long H L, Tu S S, Ge D Z, Ma L, Wang L Z. Spatial identification of land use functions and their tradeoffs/synergies in China: implications for sustainable land management. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105550.
- [27] Sanon S, Hein T, Douven W, Winkler P. Quantifying ecosystem service trade-offs: the case of an urban floodplain in Vienna, Austria. *Journal of*

- Environmental Management, 2012, 111: 159-172.
- [28] 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.
- [29] Smith R I, Barton D N, Dick J, Haines-Young R, Madsen A L, Rusch G M, Termansen M, Woods H, Carvalho L, Giucă R C, Luque S, Odee D, Rusch V, Saarikoski H, Adamescu C M, Dunford R, Ochieng J, Gonzalez-Redin J, Stange E, Vădineanu A, Verweij P, Vikström S. Operationalising ecosystem service assessment in Bayesian Belief Networks: experiences within the OpenNESS project. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 452-464.
- [30] Landuyt D, Broekx S, Goethals P L M. Bayesian belief networks to analyse trade-offs among ecosystem services at the regional scale. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 327-335.
- [31] 李鸿健, 任志远, 刘焱序, 张静. 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. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1731-1738.
- [32] 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. *生态学报*, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [33] 荣月静, 杜志勋, 郭新亚, 李霞, 陈骏宇. 太岳山地生态系统服务功能权衡协同关系研究. *环境科学与技术*, 2018, 41(11): 181-190.
- [34] Yang W, Jin Y W, Sun T, Yang Z F, Cai Y P, Yi Y J. Trade-offs among ecosystem services in coastal wetlands under the effects of reclamation activities. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 354-366.
- [35] 杨薇, 靳宇弯, 孙立鑫, 孙涛, 邵冬冬. 基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2516-2528.
- [36] Stosch K C, Quilliam R S, Bunnefeld N, Oliver D M. Quantifying stakeholder understanding of an ecosystem service trade-off. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2524-2534.
- [37] Roy S G, Uchida E, de Souza S P, Blachly B, Fox E, Gardner K, Gold A J, Jansujwicz J, Klein S, McGreavy B, Mo W W, Smith S M C, Vogler E, Wilson K, Zydlewski J, Hart D. A multiscale approach to balance trade-offs among dam infrastructure, river restoration, and cost. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(47): 12069-12074.
- [38] Depietri Y, Orenstein D E. Managing fire risk at the wildland-urban interface requires reconciliation of tradeoffs between regulating and cultural ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101108.
- [39] Garcia X, Benages-Albert M, Vall-Casas P. Landscape conflict assessment based on a mixed methods analysis of qualitative PPGIS data. *Ecosystem Services*, 2018, 32: 112-124.
- [40] Brown G, Fagerholm N. Empirical PPGIS/PGIS mapping of ecosystem services: a review and evaluation. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 119-133.
- [41] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 肖飞艳, 程昌武, 张欣蓉. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. *地理研究*, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [42] Yang S Q, Zhao W W, Liu Y X, Wang S, Wang J, Zhai R J. Influence of land use change on the ecosystem service trade-offs in the ecological restoration area: dynamics and scenarios in the Yanhe watershed, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 556-566.
- [43] 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.
- [44] Tomscha S A, Gergel S E. Ecosystem service trade-offs and synergies misunderstood without landscape history. *Ecology and Society*, 2016, 21(1): 43.
- [45] Wossink A, Swinton S M. Jointness in production and farmers' willingness to supply non-marketed ecosystem services. *Ecological Economics*, 2007, 64(2): 297-304.
- [46] Lester S E, Costello C, Halpern B S, Gaines S D, White C, Barth J A. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning. *Marine Policy*, 2013, 38: 80-89.
- [47] Le Clec'h S, Oszward J, Decaens T, Desjardins T, Dufour S, Grimaldi M, Jegou N, Lavelle P. Mapping multiple ecosystem services indicators: toward an objective-oriented approach. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 508-521.
- [48] Maes J, Paracchini M L, Zulian G, Dunbar M B, Alkemade R. Synergies and trade-offs between ecosystem service supply, biodiversity, and habitat conservation status in Europe. *Biological Conservation*, 2012, 155: 1-12.
- [49] Qiu J X, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(29): 12149-12154.
- [50] Ruijs A, Wossink A, Kortelainen M, Alkemade R, Schulp C J E. Trade-off analysis of ecosystem services in Eastern Europe. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 82-94.
- [51] 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.
- [52] Iniesta-Arandia I, García-Llorente M, Aguilera P A, Montes C, Martín-López B. Socio-cultural valuation of ecosystem services: uncovering the

- links between values, drivers of change, and human well-being. *Ecological Economics*, 2014, 108: 36-48.
- [53] Quintas-Soriano C, García-Llorente M, Norström A, Meacham M, Peterson G, Castro A J. Integrating supply and demand in ecosystem service bundles characterization across Mediterranean transformed landscapes. *Landscape Ecology*, 2019, 34(7): 1619-1633.
- [54] 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.
- [55] Cao Y, Cao Y, Li G Y, Tian Y H, Fang X Q, Li Y, Tan Y Z. Linking ecosystem services trade-offs, bundles and hotspot identification with cropland management in the coastal Hangzhou Bay area of China. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104689.
- [56] Orsi F, Ciolli M, Primmer E, Varumo L, Geneletti D. Mapping hotspots and bundles of forest ecosystem services across the European Union. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104840.
- [57] 祁宁, 赵君, 杨延征, 苟睿坤, 陈佳琦, 赵鹏祥, 李卫忠. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同. *生态学报*, 2020, 40(9): 2827-2837.
- [58] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, Dalgaard T, Svenning J C. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 89-104.
- [59] Zhang Z Y, Liu Y F, Wang Y H, Liu Y L, Zhang Y, Zhang Y. What factors affect the synergy and tradeoff between ecosystem services, and how, from a geospatial perspective? *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120454.
- [60] Qi Y, Lian X H, Wang H W, Zhang J L, Yang R. Dynamic mechanism between human activities and ecosystem services: a case study of Qinghai lake watershed, China. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106528.
- [61] Xu J Y, Chen J X, Liu Y X. Partitioned responses of ecosystem services and their tradeoffs to human activities in the Belt and Road region. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123205.
- [62] Carter Berry Z, Jones K W, Gomez Aguilar L R, Congalton R G, Holwerda F, Kolka R, Looker N, Lopez Ramirez S M, Manson R, Mayer A, Muñoz-Villiers L, Ortiz Colin P, Romero-Urbe H, Saenz L, Von Thaden J J, Vizcaino Bravo M Q, Williams-Linera G, Asbjornsen H. Evaluating ecosystem service trade-offs along a land-use intensification gradient in central Veracruz, Mexico. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101181.
- [63] 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.
- [64] Khan I, Zhao M J. Water resource management and public preferences for water ecosystem services: a choice experiment approach for inland river basin management. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 821-831.
- [65] Lyu R, Clarke K C, Zhang J M, Feng J L, Jia X H, Li J J. Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: a case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. *Applied Geography*, 2019, 108: 64-73.
- [66] 徐敏. 长江中下游浅水湖泊生态系统服务时空变化特征与机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [67] He S Y, Gallagher L, Su Y, Wang L, Cheng H G. Identification and assessment of ecosystem services for protected area planning: a case in rural communities of Wuyishan national park pilot. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 169-180.
- [68] García-Nieto A P, García-Llorente M, Iniesta-Arandia I, Martín-López B. Mapping forest ecosystem services: from providing units to beneficiaries. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 126-138.
- [69] Langemeyer J, Gómez-Baggethun E, Haase D, Scheuer S, Elmqvist T. Bridging the gap between ecosystem service assessments and land-use planning through Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). *Environmental Science & Policy*, 2016, 62: 45-56.
- [70] Kelble C R, Loomis D K, Lovelace S, Nuttle W K, Ortner P B, Fletcher P, Cook G S, Lorenz J J, Boyer J N. The EBM-DPSER conceptual model: integrating ecosystem services into the DPSIR framework. *PLoS One*, 2013, 8(8): e70766.
- [71] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [72] Wang Z F, Xu M, Lin H W, Qureshi S, Cao A K, Ma Y J. Understanding the dynamics and factors affecting cultural ecosystem services during urbanization through spatial pattern analysis and a mixed-methods approach. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123422.
- [73] 王思博, 陈秋红, 李冬冬. 中国农民多维福祉的结构与特征分析——基于结构方程模型. *农村经济*, 2019, (6): 8-14.
- [74] 李南洁, 曹国勇, 何丙辉, 罗光莲. 农户福祉与生态系统服务变化关系研究——以重庆市武陵-秦巴连片特困区为例. *西南大学学报: 自然科学版*, 2017, 39(7): 136-142.
- [75] Altman I, Blakeslee A M H, Osio G C, Rillahan C B, Teck S J, Meyer J J, Byers J E, Rosenberg A A. A practical approach to implementation of ecosystem-based management: a case study using the Gulf of Maine marine ecosystem. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(3): 183-189.
- [76] 闵勇, 常杰, 葛滢, 吴旭. 生态系统服务复杂关系研究的机遇、挑战与对策. *科学通报*, 2012, 57(22): 2137-2142.
- [77] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [78] Schröter M, Barton D N, Remme R P, Hein L. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: a conceptual model and a case study for

- Telemark, Norway. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539-551.
- [79] Geijzendorffer I R, Martín-López B, Roche P K. Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 320-331.
- [80] La Notte A, Vallecillo S, Marques A, Maes J. Beyond the economic boundaries to account for ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2019, 35: 116-129.
- [81] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [82] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [83] Wei H J, Fan W G, Wang X C, Lu N C, Dong X B, Zhao Y N, Ya X J, Zhao Y F. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: a review. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
- [84] Costanza R. Ecosystem services: multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350-352.
- [85] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [86] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, Bouten W, Verburg P H, Davidson M D. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [87] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. *地理学报*, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [88] Mehring M, Ott E, Hummel D. Ecosystem services supply and demand assessment: why social-ecological dynamics matter. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 124-125.
- [89] Mehring M, Zajonz U, Hummel D. Social-ecological dynamics of ecosystem services: livelihoods and the functional relation between ecosystem service supply and demand—evidence from socotra archipelago, yemen and the sahel region, West Africa. *Sustainability*, 2017, 9(7): 1037.
- [90] Martín-López B, Iniesta-Arandia I, García-Llorente M, Palomo I, Casado-Arzuaga I, Del Amo D G, Gómez-Baggethun E, Oteros-Rozas E, Palacios-Agundez I, Willaarts B, González J A, Santos-Martín F, Onaindia M, López-Santiago C, Montes C. Uncovering ecosystem service bundles through social preferences. *PLoS One*, 2012, 7(6): e38970.
- [91] Wilhelm J A, Smith R G, Jolejole-Foreman M C, Hurley S. Resident and stakeholder perceptions of ecosystem services associated with agricultural landscapes in New Hampshire. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101153.
- [92] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. *生态学报*, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [93] Li J H, Jiang H W, Bai Y, Alatalo J M, Li X, Jiang H W, Liu G, Xu J. Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions: a case study of the Taihu River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 1008-1016.
- [94] Sun W, Li D H, Wang X R, Li R X, Li K, Xie Y J. Exploring the scale effects, trade-offs and driving forces of the mismatch of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 617-629.
- [95] Wang L J, Zheng H, Wen Z, Liu L, Robinson B E, Li R N, Li C, Kong L Q. Ecosystem service synergies/trade-offs informing the supply-demand match of ecosystem services: framework and application. *Ecosystem Services*, 2019, 37: 100939.
- [96] Baró F, Haase D, Gómez-Baggethun E, Frantzeskaki N. Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: a quantitative assessment in five European cities. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 146-158.
- [97] Peña L, Casado-Arzuaga I, Onaindia M. Mapping recreation supply and demand using an ecological and a social evaluation approach. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 108-118.
- [98] Egarter Vigl L, Delpellegin D, Pereira P, de Groot R, Tappeiner U. Mapping the ecosystem service delivery chain: capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 422-436.
- [99] Wang J, Zhai T L, Lin Y F, Kong X S, He T. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 781-791.
- [100] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands: mapping ecosystem service flows. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 104-116.
- [101] Castro A J, Verburg P H, Martín-López B, García-Llorente M, Cabello J, Vaughn C C, López E. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: a landscape-scale spatial analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 102-110.
- [102] Castillo-Eguskitza N, Martín-López B, Onaindia M. A comprehensive assessment of ecosystem services: integrating supply, demand and interest in the Urdaibai Biosphere Reserve. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 1176-1189.
- [103] Goldenberg R, Kalantari Z, Cvetkovic V, Mörtberg U, Deal B, Destouni G. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 599-609.
- [104] 李双成. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社, 2014.
- [105] Daily G C, Polasky S, Goldstein J, Kareiva P M, Mooney H A, Pejchar L, Ricketts T H, Salzman J, Shallenberger R. Ecosystem services in

- decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 21-28.
- [106] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M A, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M R. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [107] Sparrevik M, Barton D N, Bates M E, Linkov I. Use of stochastic multi-criteria decision analysis to support sustainable management of contaminated sediments. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(3): 1326-1334.
- [108] Wilson K A, Carwardine J, Possingham H P. Setting conservation priorities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1162(1): 237-264.
- [109] 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.
- [110] Wolff S, Schulp C J E, Verburg P H. Mapping ecosystem services demand: a review of current research and future perspectives. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 159-171.
- [111] Geijzendorffer I R, Roche P K. The relevant scales of ecosystem services demand. *Ecosystem Services*, 2014, 10: 49-51.
- [112] Zhang W X, Yu Y, Wu X Q, Pereira P, Lucas Borja M E. Integrating preferences and social values for ecosystem services in local ecological management: a framework applied in Xiaojiang Basin Yunnan province, China. *Land Use Policy*, 2020, 91: 104339.
- [113] Uhde B, Hahn W A, Griess V C, Knoke T. Hybrid MCDA methods to integrate multiple ecosystem services in forest management planning: a critical review. *Environmental Management*, 2015, 56(2): 373-388.
- [114] Lau J D, Hicks C C, Gurney G G, Cinner J E. Disaggregating ecosystem service values and priorities by wealth, age, and education. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 91-98.
- [115] Zabala A, Pascual U. Bootstrapping Q methodology to improve the understanding of human perspectives. *PLoS One*, 2016, 11(2): e0148087.
- [116] Armatas C A, Venn T J, Watson A E. Applying Q-methodology to select and define attributes for non-market valuation: a case study from Northwest Wyoming, United States. *Ecological Economics*, 2014, 107: 447-456.
- [117] Armatas C, Venn T, Watson A. Understanding social-ecological vulnerability with Q-methodology: a case study of water-based ecosystem services in Wyoming, USA. *Sustainability Science*, 2016, 12(1): 105-121.
- [118] Bredin Y K, Lindhjem H, van Dijk J, Linnell J D C. Mapping value plurality towards ecosystem services in the case of Norwegian wildlife management: a Q analysis. *Ecological Economics*, 2015, 118: 198-206.
- [119] Armatas C A, Campbell R M, Watson A E, Borrie W T, Christensen N, Venn T J. An integrated approach to valuation and tradeoff analysis of ecosystem services for national forest decision-making. *Ecosystem Services*, 2018, 33: 1-18.
- [120] Grimsrud K, Graesse M, Lindhjem H. Using the generalised Q method in ecological economics: a better way to capture representative values and perspectives in ecosystem service management. *Ecological Economics*, 2020, 170: 106588.
- [121] Kearney S P, Fonte S J, García E, Siles P, Chan K M A, Smukler S M. Evaluating ecosystem service trade-offs and synergies from slash-and-mulch agroforestry systems in El Salvador. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 264-278.
- [122] Feng Q, Zhao W W, Hu X P, Liu Y, Daryanto S, Cherubini F. Trading-off ecosystem services for better ecological restoration: a case study in the Loess Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120469.
- [123] 刘静萍, 徐晋保. 不同管理模式对农田生态系统服务的影响模拟研究——以太湖流域为例. *生态学报*, 2019, 39(24): 9314-9324.
- [124] Vollmer D, Pribadi D O, Remondi F, Rustiadi E, Grêt-Regamey A. Prioritizing ecosystem services in rapidly urbanizing river basins: a spatial multi-criteria analytic approach. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 20: 237-252.
- [125] Vogdrup-Schmidt M, Strange N, Olsen S B, Thorsen B J. Trade-off analysis of ecosystem service provision in nature networks. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 165-173.
- [126] Watson K B, Galford G L, Sonter L J, Ricketts T H. Conserving ecosystem services and biodiversity: measuring the tradeoffs involved in splitting conservation budgets. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101063.
- [127] 赵文祯, 韩增林, 闫晓露, 钟敬秋. 基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建——以大连市瓦房店为例. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 546-562.
- [128] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [129] Schwaiger F, Poschenrieder W, Biber P, Pretzsch H. Ecosystem service trade-offs for adaptive forest management. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100993.
- [130] Zhou X G, Zhu H G, Wen Y G, Goodale U M, Li X Q, You Y M, Ye D, Liang H W. Effects of understory management on trade-offs and synergies between biomass carbon stock, plant diversity and timber production in eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, 2018, 410: 164-173.

- [131] Longato D, Gaglio M, Boschetti M, Gissi E. Bioenergy and ecosystem services trade-offs and synergies in marginal agricultural lands: a remote-sensing-based assessment method. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117672.
- [132] Wu S Y, Li S C. Ecosystem service relationships: formation and recommended approaches from a systematic review. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 1-11.
- [133] Wang Y, Bilsborrow R E, Zhang Q, Li J F, Song C H. Effects of payment for ecosystem services and agricultural subsidy programs on rural household land use decisions in China: synergy or trade-off? *Land Use Policy*, 2019, 81: 785-801.
- [134] Yu Y Y, Li J, Zhou Z X, Ma X P, Zhang X F. Response of multiple mountain ecosystem services on environmental gradients: how to respond, and where should be priority conservation? *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123264.
- [135] Zheng H, Wang L J, Wu T. Coordinating ecosystem service trade-offs to achieve win-win outcomes: a review of the approaches. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 82: 103-112.
- [136] Liang J, Li S, Li X D, Li X, Liu Q, Meng Q F, Lin A Q, Li J J. Trade-off analyses and optimization of Water-Related Ecosystem Services (WRESs) based on land use change in a typical agricultural watershed, southern China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123851.
- [137] Rallings A M, Smukler S M, Gergel S E, Mullinix K. Towards multifunctional land use in an agricultural landscape: a trade-off and synergy analysis in the Lower Fraser Valley, Canada. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 184: 88-100.
- [138] Koo H, Kleemann J, Fürst C. Impact assessment of land use changes using local knowledge for the provision of ecosystem services in northern Ghana, West Africa. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 156-172.
- [139] Accatino F, Tonda A, Dross C, Léger F, Tichit M. Trade-offs and synergies between livestock production and other ecosystem services. *Agricultural Systems*, 2019, 168: 58-72.
- [140] 马冰滢, 黄姣, 李双成. 基于生态-经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置. *地理科学进展*, 2019, 38(1): 26-37.