

岳邦瑞, 钱芝弘. 生态系统服务权衡与协同机制及其在景观规划中的应用 [J]. 风景园林, 2022, 29 (10) : 20-25.

生态系统服务权衡与协同机制及其在景观规划中的应用

Formation Mechanism of Trade-offs and Synergies Between Ecosystem Services and Application in Landscape Planning

岳邦瑞 钱芝弘
YUE Bangrui, QIAN Zhihong



中图分类号: TU986
文献标识码: A
文章编号: 1673-1530(2022)10-0020-06
DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.10.0020.06
收稿日期: 2022-04-28
修回日期: 2022-08-10

岳邦瑞 / 男 / 博士 / 西安建筑科技大学建筑学院教授 / 研究方向为地景规划与生态修复
YUE Bangrui, Ph.D., is a professor in the School of Landscape Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology. His research focuses on landscape planning and ecological restoration.

钱芝弘 / 女 / 西安建筑科技大学建筑学院在读博士研究生 / 研究方向为地景规划与生态修复
QIAN Zhihong is a Ph.D. candidate in the School of Landscape Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology. Her research focuses on landscape planning and ecological restoration.

摘要: 景观规划师常会面临在特定区域协调多种生态系统服务 (ESs) 间权衡与协同关系的现实需求, 而当前针对 ESs 间权衡与协同关系及其机制研究如何应用于景观规划的研究仍不足。首先, 回顾国内外关于 ESs 间权衡与协同关系研究进展, 从形成基础和变化动因两方面揭示其机制, 并梳理机制研究的方法与进展。其次, 以 3 类景观规划为例, 分析 ESs 间权衡与协同关系及机制研究可在其中发挥的作用, 并结合研究案例探索将其应用于景观规划的途径。研究 ESs 间权衡与协同关系及机制, 能够在景观规划中为实现 ESs 降权衡升协同提供重要信息: 1) 在生态功能区划中, 能指导 ESs 目标的分区分配; 2) 在生态基础设施规划中, 能指导空间网络优化方案的制定; 3) 在生态修复规划中, 能指导关键修复区域识别及修复策略的提出。最后, 提出应以规划实践为导向展开研究, 加强学科合作交流, 完善研究方法, 并探索整合多种研究成果的有效途径, 更好地将 ESs 间权衡与协同关系及机制研究应用于景观规划。

关键词: 风景园林; 景观规划; 生态系统服务; 权衡与协同; 形成机制

基金项目: 国家自然科学基金 (编号 51578437); 宁夏回族自治区重点研发计划重大 (重点) 项目 (编号 2019BBF02014); 西安市社会科学规划基金 (编号 22JX76)

Abstract: Landscape planners often face the realistic need to coordinate the trade-offs and synergies between multiple ecosystem services (ESs) in a specific area, but the research on how to apply the research on trade-offs and synergies between ESs and the mechanism thereof to landscape planning is still insufficient. In view of this, this research firstly reviews the research progress of the trade-offs and synergies between ESs at home and abroad, reveals the mechanism thereof from the two aspects of formation basis and change motivation, and sorts out the methods and progress of mechanism research. Then, taking 3 types of landscape planning projects as examples, this research analyzes the trade-offs and synergies between ESs and the role that mechanism research can play therein, and explores the way to apply them to landscape planning in combination with research cases. The research on the trade-offs and synergies between ESs and the mechanism thereof can provide important information in landscape planning for reducing trade-offs and improving synergies between ESs, such information can: 1) guide the distribution of ESs objectives in ecological function zoning; 2) guide the proposal of spatial network optimization plan in ecological infrastructure planning; 3) guide the identification of key restoration areas and the proposal of restoration strategies in ecological restoration planning. Finally, the research proposes to carry out research oriented at planning practice, strengthen cooperation and exchanges between disciplines, improve research methods, and explore an efficient way to integrate multiple research results, so as to more properly apply the research results of the trade-offs and synergies between ESs and the mechanism thereof to landscape planning.

Keywords: landscape architecture; landscape planning; ecosystem services (ESs); trade-offs and synergies; formation mechanism

Fund Items: The National Natural Science Fund of China (No. 51578437); Major (Key) Projects Under Key R&D Program of Ningxia Hui Autonomous Region (No. 2019BBF02014); Xi'an Social Science Planning Fund (No. 22JX76)

生态系统服务 (ecosystem services, ESs) 研究是提出科学合理景观规划方案的基础, 此概念自提出以来备受生态学、地理学等基础学科和城乡规划、风景园林等应用学科关注。ESs 研究框架综合了不同研究视角, 使供给、调节、支持乃至社会服务等存在于同一体系, 实现了学科细分后的生态系统评价与认知的再整合^[1], 与景观规划整合社会、生态、经济等多重目标的需求相契合。在实践中, 景观规划可以通过改变土地覆被类型和景观格局改变生态系统功能, 进而影响生态系统服务的类型和分布^[2]。

ESs 间普遍存在权衡和协同作用。通过景观规划管理多种服务功能, 通常需要确定 ESs 间的关系类型, 并分析其形成机制。土地利用及景观管理目标变化是 ESs 间权衡或协同关系形成的主要驱动因素之一^[3-4]。在景观规划中如果忽视对 ESs 间权衡与协同关系的研究, 而盲目追求某些服务供给的最大化, 则可能由于 ESs 间的权衡作用导致其他服务的供给能力被破坏。有研究发现, 由于规划中对多种服务管理的需求逐渐凸显, 使得 ESs 间权衡与协同关系方面的研究迅速增加, 其中机制层面的研究是有效指导规划管理的关键^[5-6]。

为推进 ESs 间权衡与协同关系方面的研究在景观规划中的应用, 本研究通过梳理 ESs 间关系类型、权衡与协同关系的表征方式及其机制的研究方法, 探讨如何针对特定类型的景观规划需求, 展开 ESs 间权衡与协同关系的研究, 并将研究成果应用于景观规划中。

1 ESs 间权衡与协同关系内涵及其研究现状

1.1 ESs 间权衡与协同关系内涵

ESs 间的关系包括权衡 (trade-offs)、协同 (synergies) 和兼容 (compatible) 3 类, 本研究仅关注 ESs 间权衡与协同关系。在分析 ESs 供给间的相关关系时, 若呈现出负相关 (此消彼长) 则为权衡关系^[4-5], 正相关 (同增同减) 则为协同关系, 无显著关系则为兼容^[6]。若以 ESs 间的作用关系区分, 有明显的促进作用属于协同, 有明显的抑制作用属于权衡, 没有明显作用关系则为兼容。ESs 供给间的相关关

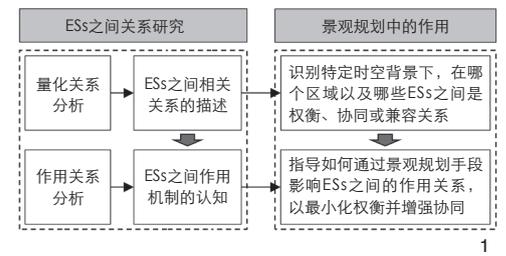
系研究能够识别 ESs 间关系类型及其所在区域, 而 ESs 间的作用关系研究则能够明确 ESs 间权衡与协同关系的形成机制, 进而指导规划策略的提出 (图 1)。

ESs 权衡^①所表达的语义更为广泛, 既可指 ESs 供给间此消彼长的权衡关系, 也可以强调对 ESs 消费取舍的权衡行为, 能将 ESs 间关系认知和行为决策结合在一起^[7-8]。由于 ESs 间关系能够互相转变, 研究过程一致且总是交织于一起, 很多研究将 ESs 间关系研究统称为 ESs 权衡研究^[1], 具体的研究方向有供给端权衡、供给需求权衡、需求端权衡、利益主体权衡、时空权衡及可逆权衡等^[1,8-9]。

ESs 间权衡或协同关系出现的原因有两方面, 即一定空间范围内 ESs 供给具有多重性和人类对服务的需求偏好^[10]。气候变化、土地利用改变、生态工程建设等驱动因素往往会引起多重 ESs 的变化, 促使各类服务之间呈现权衡、协同或兼容的状态, 而人类对服务的需求偏好则往往是促使驱动产生的根本原因。实际情况中, ESs 间权衡或协同关系的形成与转化过程较为复杂, 仅通过定量分析识别权衡或协同关系类型及强度, 不足以指导规划决策, 还需从机制层面展开分析, 认知哪些人类活动会对 ESs 间权衡或协同关系产生怎样的影响。

1.2 ESs 间权衡与协同关系表征方式及分析方法

ESs 间权衡与协同关系的识别是展开机制研究的基础, 然而不同研究的识别结果有时反映的内涵和意义也不相同, 受 ESs 间关系研究方法的影响。Ndong 等发现, 对 ESs 关系的研究可建立在 3 个标准之上, 并在此基础上将识别 ESs 关系的定量研究方法分为 6 种。3 个标准是: 1) “时间变异性”, 在研究中是否明确考虑时间动态; 2) “空间离散化”, 在研究中是否考虑 ESs 间关系的空间维度; 3) “ESs 间关系的驱动因素”, 在研究中是否考虑此关系背后的驱动因素。6 种定量研究方法为静态空间共现分析、静态空间关系分析、历时空间共现分析、历时空间关系分析、历时空间变化共现分析和动态空间变化分析。其中, 3 种空间的共现分析均考虑了 ESs 间关系的空间位置, 通过空间协方差、重叠、相关等途



1 生态系统服务间关系研究在景观规划中的作用
Role of the research on the relationships among ecosystem services in landscape planning

径分析 ESs 间关系^[4]。在研究中是否涉及 ESs 关系的驱动因素分析, 决定了所得结果是机制层面的分析, 还是仅属于量化描述。ESs 间关系分析工具、识别结果与研究方法密切相关, 若要比对不同研究的结果, 则要考虑研究方法的异同。

ESs 间权衡与协同关系分析中的常用方法可归纳为成对或成组 ESs 间关系分析方法。成对 ESs 间权衡与协同关系分析方法包括相关性分析法、权衡协同度法、叠加分析法^[11]及贝叶斯网络 (Bayesian belief network, BBN)^②模型法等, 方法之下还有众多分析工具。成组 ESs 间权衡与协同关系分析方法有因子分析法、主成分分析法和生态系统服务簇法^[12]等。在实践研究中比较常用的是叠加分析法、生态系统服务簇法和动态相关性法^[13]。叠加分析法和生态系统服务簇法都能利用空间制图表达, 前者适合分析成对 ESs 间关系, 后者适合分析成组 ESs 间关系。动态相关性分析有助于研究 ESs 间权衡与协同关系变化的驱动过程, 但是否通过空间制图表达, 则依具体目标而定。

1.3 ESs 间权衡与协同关系研究在空间规划中的作用

一些规划领域专家已经探索了 ESs 间权衡与协同关系研究在空间规划中的作用及应用途径。王志芳等提出 ESs 权衡研究对规划管理目标设定、空间优化、生态补偿、公众参与具有重要意义^[1]。欧小杨等、艾昕等分别基于 ESs 间权衡与协同关系研究提出城市生态空间分区及生态网络规划方案^[14-15]。邵明等基于 ESs 间权衡与协同关系及机制研究, 提出城市生态空间识别与管控的实践途径^[16]。王

场研究了休闲游憩和气候调节服务间的权衡关系, 据此提出公园绿地布局的优化方法^[17]。此外, 在国土空间规划中对 ESs 间权衡与协同关系的研究, 对于生态空间格局构建、规划及分区分管方面均具有重要的实践意义^[18-20]。

2 ESs 间权衡与协同关系机制研究内容及进展

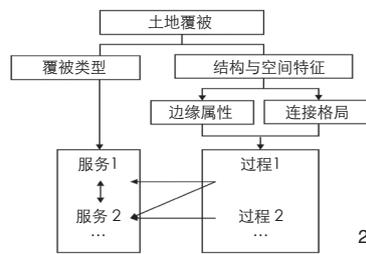
2.1 ESs 间权衡与协同关系机制研究内容

ESs 间权衡与协同关系机制研究可以从 2 个层面展开, 即各类 ESs 如何形成与供给、ESs 间权衡与协同关系如何形成与转化, 前者是 ESs 间权衡与协同关系的形成基础, 后者是其形成动因。

土地覆被变化同时会对多种 ESs 的形成与供给产生影响。根据“格局—过程—功能—服务”^[21]的级联框架, 可知改变景观格局能影响 ESs 的供给。景观格局在区域尺度上的变化主要表现为土地覆被状况的改变^[22], 可以从覆被类型以及结构与空间特征两方面来描述^[23]。研究表明, 调控土地覆被类型可直接改变 ESs 供给类型, 而其结构与空间特征的变化则会对生态过程产生影响并间接作用于 ESs 的供给^[24-25] (图 2)。

研究发现, 不同类型 ESs 对土地覆被类型变化、结构与空间特征变化的敏感程度不同, 产生的响应也不同, 这种响应还受到研究尺度和区域景观特征影响^[23]。分析特定情景下的 ESs 间权衡与协同关系如何形成, 需先明确 ESs 类型、研究尺度及区域景观特征, 分析 ESs 供给对土地覆被变化的响应情况。若对覆被类型的变化敏感, 需分析能提供 ESs 的主要景观的特征是否一致或相近; 若对覆被结构与空间特征变化敏感, 需分析 ESs 供给过程之间是否有明显相互作用。上述内容可用于解释为何有些 ESs 在时空分布上具有很强的 consistency, 而有些 ESs 在同一时空范围内却几乎不会同时出现。

Bennett 等将 ESs 间权衡与协同关系形成动因概括为“不同类 ESs 对同一驱动因素产生响应”及“ESs 之间的相互作用”两类, 其研究展示了 6 种情景下 ESs 间权衡与协同关系的形成动因 (图 3): 1) 对同一驱动因素的响

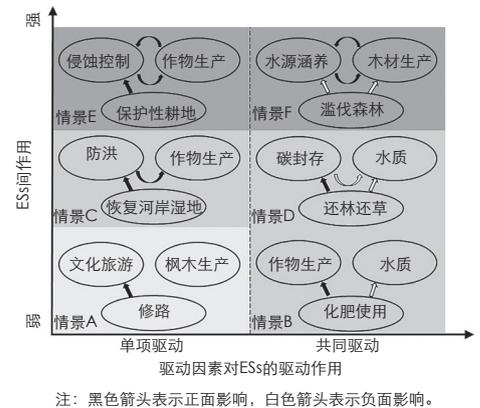


2 土地覆被变化对 ESs 的影响过程

Impact process of land cover change on ESs

3 不同情景中 ESs 间权衡与协同关系的形成动因^[26]

Formation motivation of trade-offs and synergies between ecosystem services in different scenarios^[26]



注: 黑色箭头表示正面影响, 白色箭头表示负面影响。

3

表 1 ESs 间权衡与协同关系机制研究^[33-36]

Tab. 1 Research on the formation mechanism of the trade-offs and synergies among ESs^[33-36]

研究内容	涉及的 ESs 类型	分析方法	参考文献
农业土地整治对 ESs 间权衡与协同关系的影响机制	作物生产、碳固存、水土保持	InVEST 模型、Pearson 相关性分析、均方根偏差分析	[33]
盆地中的山区和平原 ESs 间权衡与协同关系的测度及其驱动分析	生物多样性保护、水源供给、水产品供给、水土保持、水质净化	相关性分析、雷达图、冗余分析	[34]
农村景观服务间权衡或协同关系的空间分布受城乡环境及地形梯度的影响分析	碳固存、栖息地维持、水源供给、水土保持、粮食生产、基础设施建设、住宅建设、娱乐旅游空间供给、环境美质量度提升	景观服务评估、Spearman 相关性分析	[35]
设置不同土地利用情景, 分析农业用地强度和土地利用类型对 ESs 间权衡与协同关系的影响	粮食生产、水质净化	InVEST 模型、情景模拟、相关性分析	[36]

应导致 ESs 间权衡与协同关系的形成, 如情景 B; 2) ESs 间的相互作用导致其特定关系的形成, 如情景 C、E; 3) 共同驱动因素和 ESs 间相互作用同时产生影响, 共同导致 ESs 间权衡与协同关系的形成, 如情景 D、F^[26]。

“形成基础”可解释为何 ESs 间普遍存在权衡与协同关系, “形成动因”可反映不同情景下 ESs 间权衡与协同关系的形成受何种驱动, 两方面的研究可共同解释 ESs 间权衡与协同关系的形成机制。

2.2 ESs 间权衡与协同关系机制的研究方法

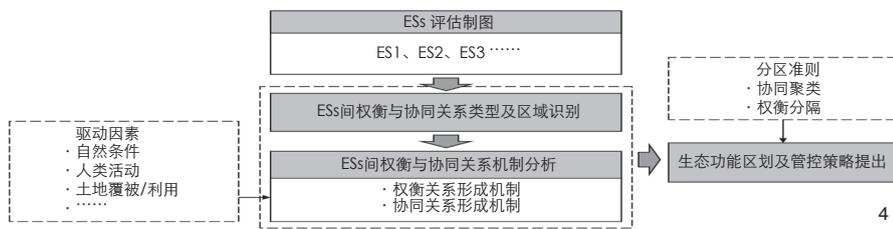
ESs 间权衡与协同关系的研究方法, 如相关性分析法、叠加分析法, 在统计学意义上反映了不同 ESs 变化趋势及空间分布一致性, 并以此标准识别 ESs 间权衡或协同的关系类型, 但无法解释 ESs 间权衡与协同关系形成与变化的因果性^[27-28]。通过 ESs 供给的量化关系分析可识别 ESs 间权衡与协同关系的区域位置, 能促使规划管理人员通过地理空间制图分析展开沟通。若要认知 ESs 间权衡与协

同关系机制, 则要回到具体情景中, 分析可能的驱动因素及其引起的生物物理过程之间的相互作用。

采用情景分析^[29]、对照实验^[30]和过程模拟^[31]研究 ESs 间权衡与协同关系及其机制, 是通过量化 ESs 供给和驱动因素之间的联系及程度, 来反映 ESs 间权衡与协同的作用情况。对照实验是 3 种方法中最精准的, 但受研究尺度及可控变量的限制, 在研究中很少使用。亦可选择因果推断法^[32]来研究 ESs 间权衡与协同关系及其机制, 假设变量之间的因果联系, 通过抽样和统计分析检验因果假设的可信度, 在统计分析中应注意控制混杂变量。相对而言, 情景分析和过程模拟的组合应用最广泛, 是规划决策分析的重要工具。

2.3 ESs 间权衡与协同关系机制研究进展

对 ESs 间权衡与协同关系机制的研究通常从驱动因素着手, 包括自然环境及人类活动产生的影响, 分析关系形成与变化过程 (表 1)。自然环境的影响包括气候变化及环境梯度的

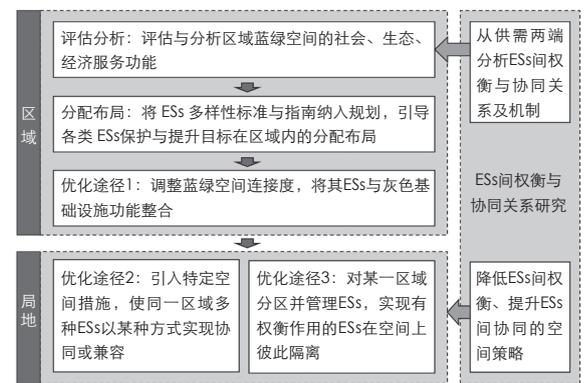


4 ESs 间权衡与协同关系及机制研究应用于生态功能区划的途径

An approach to apply the research on trade-offs and synergies between ESs and the mechanism thereof to ecological function regionalization

5 ESs 间权衡与协同关系及机制研究应用于生态基础设施规划中的途径

An approach to apply the research on trade-offs and synergies between ESs and the mechanism thereof to ecological infrastructure planning



5

影响^[37-38]，而人类活动则从土地覆被 / 利用变化、干预方式与强度两方面展开研究。Ndong 等发现，既有研究大多关注土地覆被 / 利用变化这一驱动因素，此驱动因素可用于反映城市化、农业生产等人类活动对 ESs 间权衡与协同关系的影响。也有研究通过分析温度或降水影响，将气候视为驱动因素，探讨不同耕作制度（有机耕作或常规耕作）及土地使用强度（集约化或非集约化发展）对 ESs 间权衡与协同关系产生的影响^[4]。Dade 等研究发现，所有 ESs 间权衡与协同关系的研究中考虑驱动因素的占多数，但大部分只作定性分析而未进行量化评估^[5]。

当前，ESs 间权衡与协同关系机制研究尚有较大发展空间，研究较多关注规划管理这一驱动因素，而对文化、宗教和技术驱动因素的关注则较少^[5]。此外，ESs 间权衡与协同关系机制研究还受数据可得性和分析模型的信度与效度影响，对长周期监测数据（如气象、水文数据）的积累和模型的不断完善是推动该研究发展的关键。虽然 ESs 间权衡与协同关系机制研究对规划决策非常重要，但其应用尚处于探索阶段。

3 ESs 间权衡与协同关系识别及其机制研究在景观规划中的应用

ESs 间权衡与协同关系识别和机制研究，可为探索能降低 ESs 权衡、提升 ESs 协同的规划路径提供重要信息。景观规划是通过调整空间结构和功能来协调人与自然关系的手段^[39]，包括生态基础设施规划、生态网络规划、生态功能区划等。本研究选择生态功能

区划、生态基础设施规划和生态修复规划 3 种类型的景观规划，探讨 ESs 间权衡与协同关系及机制研究在其中的作用及应用途径。

3.1 生态功能区划

在生态功能区划（ecological function regionalization, EFR）中，以协同聚类与权衡分隔的原则将各类 ESs 保护与提升目标分配到不同区域并提出管控策略，可以提升 ESs 间的协同作用并降低权衡，ESs 间权衡与协同关系机制研究能为此提供重要依据。生态功能区划是指根据区域生态系统格局、生态环境敏感性与 ESs 空间分异规律，将区域规划为不同的生态功能区^[40]，其本质为生态系统服务区划^[41]。

已有多位专家的研究探索了将 ESs 间权衡与协同关系识别及机制分析引入城市生态功能区划的途径^[15-16, 42]。该途径通常包括：1) 对多种 ESs 的评估制图；2) 识别 ESs 间权衡与协同关系及区域；3) 结合区域特征，分析 ESs 间权衡与协同关系形成机制；4) 提出生态功能区划方案及各区对应的管控策略（图 4）。但该类研究尚处于探索阶段，未在规划实践中推广，且主要以 ESs 间权衡与协同关系量化分析为主，对作用机制的研究不足。

3.2 生态基础设施规划

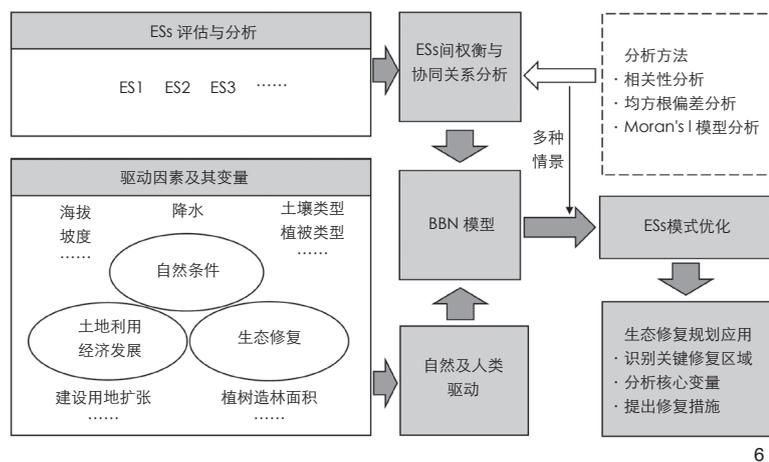
在生态基础设施（ecological infrastructure, EI）规划中，厘清哪些 ESs 类型在何种情况下呈现权衡或协同状态，可指导优化生态空间网络。EI 包括城市绿地、湿地等自然和半自然系统，EI 规划的目的是保障城市生态功能正常运行，且居民能持续地从中获得 ESs，是城市可持续发展的重要保障和支撑^[43]。EI 规划通常涉及多种 ESs 供给的管理，对 ESs 间权衡

与协同关系的识别及机制研究能够为其提供重要信息。

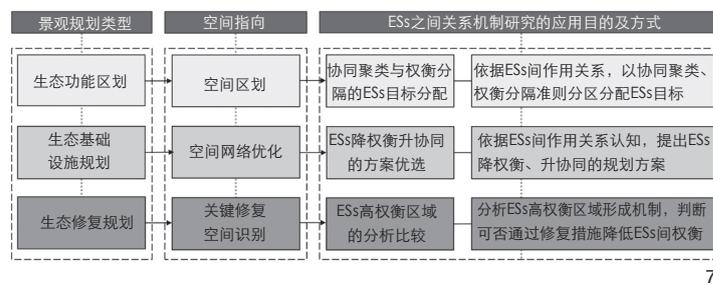
为提出合理的 EI 规划方案，需创建数据库以评估城市生态、社会功能，并全面分析 ESs 间权衡与协同关系，EI 规划方案和措施不仅要促进多重功能共存，还要降低 ESs 间的权衡及提升 ESs 间的协同作用，以避免在追求某些 ESs 供给时严重损害其他功能^[44-47]。基于 Hansen 等在研究中提出的促进城市 EI 规划多功能性建议^[47]，本研究提出了完善后的 EI 规划程序，并呈现了 ESs 间权衡与协同关系及其机制研究应用于 EI 规划中的途径（图 5）。笔者梳理了国内多个 EI 规划项目，虽然规划目标都反映出对多种 ESs 的诉求，但均未对 ESs 间权衡与协同关系及其机制进行系统研究，因此提出的实现多功能目标的空间措施也缺乏依据^[48-50]。

3.3 生态修复规划

在生态修复规划中，识别关键 ESs 的高权衡区域，分析 ESs 间权衡关系形成机制，能够判断出可否通过一定修复措施降低 ESs 间权衡。传统意义的生态修复是指对已退化、损害或被彻底破坏的生态系统进行恢复，以实现生态系统保护和 ESs 供给能力提升^[51]。国土空间规划背景下的生态修复是：依据生态系统本底状态，调整人为措施干预强度，因地制宜地恢复已退化或修复已损毁生态系统的结构及功能，并积极保护与提升 ESs 供给能力^[52]，规划是生态修复工作链中的关键环节。在生态修复规划中研究 ESs 间权衡与协同关系机制，可指导 ESs 间降低权衡、提升协同的修复规划方案的提出。



6



7

6 ESs 间权衡与协同关系及机制研究应用于生态修复规划中的途径^[53]

An approach to apply the research on trade-offs and synergies between ESs and the mechanism thereof to ecological restoration planning^[53]

7 ESs 间权衡与协同关系及机制研究应用于 3 类景观规划的空间指向、应用目的及方式
Spatial orientation and application purpose and method with respect to the application of the research on trade-offs and synergies between ESs and the mechanism thereof to the three types of landscape planning

已有大量研究探讨了过去几十年间中国退耕还林还草等生态修复工程对 ESs 间权衡与协同关系的影响。此外, Peng 等以贵州省为例, 提出 ESs 间权衡与协同关系研究在生态修复中的应用途径, 通过分析影响 ESs 间权衡与协同关系的驱动因素的变量, 包括自然因子(温度、坡度、降水、土壤类型、实际蒸散量等)和人为因子(土地覆被/利用变化、社会经济发展、生态治理项目实施等), 训练 BBN 模型以分析上述因子对 ESs 间权衡或协同关系的影响程度。并基于以上分析, 提出改变 ESs 高权区影响因子中的关键变量及组合, 实现降低 ESs 间权衡作用的目的^[53](图 6)。当前, 在生态修复工作评价中, 对 ESs 间关系的研究逐渐被重视, 但在修复工作的前期调研分析阶段依旧缺乏此类研究。

综上所述, 在 3 类景观规划中, 应用 ESs 间权衡与协同关系及机制研究的空间指向、应用目的及方式均有所不同(图 7)。

4 研究展望

ESs 间权衡与协同关系及机制研究对景观规划的意义不言而喻但研究方法多样, 研究体系尚不成熟, 研究成果又具有动态性、地域性等局限性, 导致难以将其普遍应用于景观规划实践。为将研究与实践更好地结合, 未来可在研究中重点关注以下 4 个方面。

1) 以规划实践需求为导向, 开展 ESs 间权衡与协同关系及机制研究。ESs 间权衡与协同关系研究在近年发展迅速, 但仍停留在认

知层面, 研究成果与规划实践需求存在差距, 使其难以发挥指导作用。对于不同类型的景观规划而言, ESs 间权衡与协同关系及机制研究能够补充规划的前期研究, 完善规划程序及方案。因此, ESs 间权衡与协同关系及机制研究在哪些景观规划的哪个环节能够发挥什么样的作用, 以及适合的研究方法及表征方式有哪些, 均需进一步展开研究。

2) 加强学科合作交流, 引入生态学、地理学等学科最新研究成果。当前, 从自然科学到人文社科的学科都非常注重 ESs 研究, 不断涌现出来的研究成果, 包括方法、技术等, 都是研究 ESs 间权衡与协同关系机制的重要资源。有的学科擅长通过监测分析及生态过程模拟, 认知特定情景中 ESs 间权衡与协同关系的驱动因素及过程; 有的学科则擅长利用调查研究、比较研究等方法, 对不同利益主体及不同时空背景下的 ESs 需求权衡进行研究。将不同领域学科研究中涌现出的新方法、新成果整合进 ESs 间权衡与协同关系及机制研究至关重要。

3) 完善 ESs 间权衡与协同关系及机制研究方法, 降低研究结果的不确定性。ESs 间权衡与协同机制研究离不开对 ESs 间关系类型及区域识别, 对其机制的解释也依赖于驱动因素分析, 所采用的定性、定量方法均有局限性。此外, ESs 间权衡与协同关系具有动态性、地域性, 研究结果深受研究尺度影响^[54-55], 充分认知研究的特殊性以及结果的不确定性非常必要。完善研究方法、明确方法适用

范围, 并将研究结果的不确定性控制在一定范围内, 是将此研究推广应用于景观规划的关键环节。

4) 探索将 ESs 间权衡与协同关系研究成果整合到景观规划实践的更优途径。ESs 间关系分析的理论及技术工具, 通常来自不同学科、不同范式的研究。景观规划面临的是复杂现实环境, 其目标往往整合了生态、经济、社会等多方面诉求。如何将不同学科、不同范式的研究成果更好地整合到景观规划程序中, 从而实现管理多类型 ESs 的目标, 亟待深入研究。

致谢 (Acknowledgments):

感谢李泽青、王敬儒、潘卫涛、王蓓、费凡、丁禹元、颜雨晗、姚龙杰同学为本文提出宝贵修改意见。

注释 (Notes):

- ① ESs 间权衡关系中的“权衡”是指 ESs 供给间此消彼长的量化关系或相互的抑制作用, 是生态系统种存在的客观规律; 而 ESs 消费取舍的权衡行为中的权衡则指“比较、衡量”, 是由于人的偏好促使在 ESs 选择消费时进行比较与衡量的过程。
- ② 贝叶斯网络模型具有因果和概率性语义, 可以用来学习数据中的因果关系, 该模型的应用可量化分析 ESs 间权衡与协同关系的关键驱动因素。

参考文献 (References):

- [1] 王志芳, 彭瑶瑶, 徐传语. 生态系统服务权衡研究的实践应用进展及趋势 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55 (4): 773-781.
- [2] 李方正, 彭丹麓, 王博娅. 生态系统服务研究在景观规

- 划中的应用[J]. 景观设计学, 2019, 7(4): 56-69.
- [3] KISHOR A, TEK M, ARMANDO A. How much do We Know About Trade-offs in Ecosystem Services? A Systematic Review of Empirical Research Observations[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 151229.
- [4] NDONG O G, THEROND O, COUSIN I. Analysis of Relationships Between Ecosystem Services: A Generic Classification and Review of the Literature[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101120.
- [5] 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.
- [6] LEE H, LAUTENBACH S. A Quantitative Review of Relationships Between Ecosystem Services[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 340-351.
- [7] 张永民. 生态系统与人类福祉: 评估框架: 千年生态系统评估[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [8] 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.
- [9] 张碧天, 闵庆文, 焦雯璐, 等. 生态系统服务权衡研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5517-5532.
- [10] 李双成, 谢爱丽, 吕春艳, 等. 土地生态系统服务研究进展及趋势展望[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(12): 82-89.
- [11] EGOH B, REYERS B, ROUGET M, et al. Mapping Ecosystem Services for Planning and Management[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 127(1-2): 135-140.
- [12] ZHAO M Y, PENG J, LIU Y X, et al. Mapping Watershed-Level Ecosystem Service Bundles in the Pearl River Delta, China[J]. *Ecological Economics*, 2018, 152: 106-117.
- [13] 刘海, 武靖, 陈晓晓. 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.
- [14] 欧小杨, 王婧, 吴佳霖, 等. 基于多种保护特征协同与权衡的区域自然保护地网络规划: 以北京为例[J]. *中国园林*, 2020, 36(10): 104-109.
- [15] 艾昕, 兰亦阳, 郑曦. 基于生态系统服务协同增益的城市生态空间区划研究: 以北京市生态涵养区为例[J]. *风景园林*, 2020, 27(11): 82-89.
- [16] 邵明, 李方正. 城市生态空间生态系统服务功能权衡协同及管控研究: 以成都东部新城为例[J]. *风景园林*, 2021, 28(7): 114-120.
- [17] 王旻. 健康生态系统服务视角下的公园游憩和降温服务权衡关系研究: 基于GWR量化分析[J]. *城市建筑*, 2021, 18(19): 183-188.
- [18] 高吉喜, 徐德琳, 乔青, 等. 自然生态空间格局构建与规划理论研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 749-755.
- [19] 陈阳, 岳文泽, 张亮, 等. 国土空间规划视角下生态空间管制分区的理论思考[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(8): 1-9.
- [20] 李睿倩, 李永富, 胡恒. 生态系统服务对国土空间规划体系的理论与实践支撑[J]. *地理学报*, 2020, 75(11): 2417-2430.
- [21] MYÜLLER F, DE GROOT R, WILLEMEN L. Ecosystem Services at the Landscape Scale: The Need for Integrative Approaches[J]. *Landscape Online*, 2010, 23: 1-11.
- [22] 苏常红, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的关系及其对生态系统服务的影响[J]. *自然杂志*, 2012, 34(5): 277-283.
- [23] 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.
- [24] HAO R F, YU D Y, LIU Y P, et al. Impacts of Changes in Climate and Landscape Pattern on Ecosystem Services[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 718-728.
- [25] FAGERHOLM N, KAYHKO N, NDUMBARO F, et al. Community Stakeholders' Knowledge in Landscape Assessments: Mapping Indicators for Landscape Services[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 421-433.
- [26] BENNETT E M, PETERSON G D, GORDON L J. Understanding Relationships among Multiple Ecosystem Services[J]. *Ecology Letters*, 2010, 12(12): 1394-1404.
- [27] SUGIHARA G, MAY R, YE H, et al. Detecting Causality in Complex Ecosystems[J]. *Science*, 2012, 338(6106): 496-500.
- [28] CORD A F, BARTKOWSKI B, BECKMANN M, et al. Towards Systematic Analyses of Ecosystem Service Trade-offs and Synergies: Main Concepts, Methods and the Road Ahead[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [29] 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.
- [30] CLASSEN A, PETERS M K, FERGER S W, et al. Complementary Ecosystem Services Provided by Pest Predators and Pollinators Increase Quantity and Quality of Coffee Yields[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 281(1779): 20133148.
- [31] LAUF S, HAASE D, KLEINSCHMIT B. Linkages Between Ecosystem Services Provisioning, Urban Growth and Shrinkage: A Modeling Approach Assessing Ecosystem Service Trade-offs[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 42: 73-94.
- [32] LAW E A, FERRARO P J, ARCESE P, et al. Projecting the Performance of Conservation Interventions[J]. *Biological Conservation*, 2017, 215: 142-151.
- [33] ZHONG L N, WANG J, ZHANG X, et al. Effects of Agricultural Land Consolidation on Ecosystem Services: Trade-offs and Synergies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 264: 121412.
- [34] SUN X Y, SHAN R F, LIU F. Spatio-Temporal Quantification of Patterns, Trade-offs and Synergies Among Multiple Hydrological Ecosystem Services in Different Topographic Basins[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122338.
- [35] WANG J Y, CAO Y, FANG X Q, et al. Identification of the Trade-offs/Synergies Between Rural Landscape Services in a Spatially Explicit Way for Sustainable Rural Development[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300: 113706.
- [36] ZHENG H N, PENG J, QIU S J, et al. Distinguishing the Impacts of Land Use Change in Intensity and Type on Ecosystem Services Trade-offs[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115206.
- [37] FIEDLER S, MONTEIRO J A F, HULVEY K B, et al. Restoration Ecologists Might not Get what They Want: Global Change Shifts Trade-offs Among Ecosystem Functions[J/OL]. *BioRxiv*: 1-28[2022-03-20]. <https://doi.org/10.1101/2020.12.21.423790>.
- [38] ALLISON S D, TRESEDER K K. Warming and Drying Suppress Microbial Activity and Carbon Cycling in Boreal Forest Soils[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(12): 2898-2909.
- [39] 李方正, 彭丹麓, 王博娅. 生态系统服务研究在景观规划中的应用[J]. 景观设计学, 2019, 7(4): 56-69.
- [40] 祝光耀, 张塞. 生态文明建设大辞典(第二册)[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2016.
- [41] 蔡佳亮, 殷贺, 黄艺. 生态功能区划理论研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(11): 3018-3027.
- [42] 刘颂, 谌诺君, 董宇翔. 基于生态系统服务簇的生态功能区划及管控策略研究: 以嘉兴市为例[J]. *园林*, 2022, 39(3): 21-29.
- [43] 韩林梳, 张淼, 石龙宇. 生态基础设施的定义、内涵及其服务能力研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7311-7321.
- [44] DEMUZERE M, ORRU K, HEIDRICH O, et al. Mitigating and Adapting to Climate Change: Multi-functional and Multi-scale Assessment of Green Urban Infrastructure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146: 107-115.
- [45] SUSSAMS L W, SHEATE W R, EALES R P. Green Infrastructure as a Climate Change Adaptation Policy Intervention: Muddying the Waters or Clearing a Path to a More Secure Future?[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 147: 184-193.
- [46] KREMER P, HAMSTEAD Z A, MCPHEARSON T. The Value of Urban Ecosystem Services in New York City: A Spatially Explicit Multicriteria Analysis of Landscape Scale Valuation Scenarios[J]. *Environmental Science and Policy*, 2016, 62: 57-68.
- [47] HANSEN R, OLAFSSON S A, P. N. VAN DER J A, et al. Planning Multifunctional Green Infrastructure for Compact Cities: What Is the State of Practice?[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 99-110.
- [48] 陈懿慧. 山地平原过渡地区生态空间规划与管控: 以广西贵港市为例[J]. *城市建筑*, 2021, 18(18): 60-62.
- [49] 张浪, 姚凯, 张岚. 上海市生态用地规划机制研究: 以大治河生态廊道为例[J]. *风景园林*, 2012, 19(6): 95-98.
- [50] 汪云, 刘菁. 特大城市生态空间规划管控模式与实施路径[J]. *规划师*, 2016, 32(3): 89-93.
- [51] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64-69.
- [52] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 等. 国土空间生态修复布局研究进展[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(11): 1925-1941.
- [53] PENG L, CHEN T T, DENG W, et al. Exploring Ecosystem Services Trade-offs Using the Bayesian Belief Network Model for Ecological Restoration Decision-Making: A Case Study in Guizhou Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108569.
- [54] PAUL R J, DOUGLAS B T, BENNETT E M, et al. Trade-offs Across Space, Time, and Ecosystem Services[J]. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28-42.
- [55] 韩会庆, 杨建强, 陈思盈, 等. 喀斯特山区淡水生态系统服务权衡-协同关系的空间粒度效应[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(1): 45-55.

图表来源 (Sources of Figures and Table):

图3改绘自参考文献[26], 图6改绘自参考文献[53]; 表1根据参考文献[33]~[36]整理; 其余图片均由作者绘制。

(编辑/李清清)