

DOI: 10.5846/stxb201902250344

刘焱序, 傅伯杰. 景观多功能性: 概念辨析、近今进展与前沿议题. 生态学报, 2019, 39(8): - .

Liu Y X, Fu B J. Landscape multifunctionality: concept clarification, recent progress, and frontier issues. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): - .

景观多功能性: 概念辨析、近今进展与前沿议题

刘焱序¹, 傅伯杰^{1,2,*}

1 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 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

摘要: 景观多功能性是指景观同时提供多种功能, 且不同功能间存在相互作用的特性。良好的景观多功能性可以有效提升区域人类福祉, 使景观多功能性成为一项典型的人地耦合研究议题。然而, 概念不明确、计量方法粗略、实践应用较少是当前制约景观多功能性研究继续深化的重要障碍。本研究通过明晰景观多功能性与生态系统功能、生态系统服务、土地功能、景观服务、景观可持续性等近似概念的逻辑关系, 梳理近年来国际上农业景观多功能性、城市景观多功能性以及具有区域特色的景观多功能性研究进展, 发现格局-过程-服务-可持续性的级联研究链条已逐渐显现。未来景观多功能性研究有待基于供需原理优化景观功能评估指标与方法, 正确认知景观功能主导性与多样性的关系, 探究可持续发展目标达成的多目标协同途径, 为国土空间优化提供理论、方法与实践指引。

关键词: 多功能景观; 生态系统服务; 景观可持续性; 自然资源管理; 前沿议题

Landscape multifunctionality: concept clarification, recent progress, and frontier issues

LIU Yanxu¹, FU Bojie^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Landscape multifunctionality refers to the characteristic of landscapes in which they provide multiple different functions, which interact with each other, at the same time. Good landscape multifunctionality can effectively improve regional human well-being, making landscape multifunctionality a typical topic of human-land coupling research. However, vague concepts, rough measurement methods, and a lack of practical application are major obstacles to the further development of landscape multifunctionality research. This study clarified the concepts and the logical relationships among ecosystem function, ecosystem service, land function, landscape service, and landscape sustainability. International studies in recent years classified as agricultural landscape multifunctionality, urban landscape multifunctionality, and other and others featuring regional landscape multifunctionality have been reviewed. The cascade research chain of “pattern, process, service, sustainability” has gradually emerged. Four frontier issues were set in this study, comprising the following: optimizing the indicators and methods of landscape function evaluation based on the principle of supply and demand; correctly understanding the relationship between the dominance and diversity of landscape function; exploring a multi-objective collaborative approach to achieve sustainable development goals; and providing theoretical, methodological, and practical guidance for the optimization of national territory development.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0604701); 中国博士后科学基金项目 (2018T110066, 2017M620029); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

收稿日期: 2019-02-25; 修订日期: 2019-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bfu@rcees.ac.cn

首先,景观生态学语境下的景观功能并不是更大尺度的生态系统功能。虽然在尺度意义上,多种生态系统组成的景观是更为宏观的空间单元,但景观功能一词通常在使用中相比生态系统功能更为聚焦。具体而言,生态系统过程与生态系统功能高度相关,一般认为二者的直接区别在于现象和后果的区别^[20]。生态系统过程用于描述一种客观现象,没有主客体之分;生态系统功能则体现了该客观现象对某种客体产生的后果。针对生态系统功能这一相对宽泛的概念,如果上述作用客体是人类,作用后果能够对人类产生直接或间接收益,则这一类功能可以被表述为生态系统服务。简而言之,生态系统服务就是人类从生态系统获得的各种惠益^[21],是景观多功能性形成的物质基础^[17]。考虑到景观多功能性研究对人类福祉的关注,不宜直接将景观多功能性关联于生态系统功能这种宽泛的表述形式。

其次,土地系统研究中的土地功能与景观生态研究中的景观服务在研究内容上相重合。景观服务一词源于生态系统服务,特指生态系统服务在景观上的空间表达^[5-6]。由于景观服务一词出现较晚,因而一些研究也使用景观功能一词,并通过生态系统服务制图评估景观功能和多功能性^[7-8]。根据词汇出现时间的早晚,可以认为景观功能和景观服务属于近义词,在字面意义上后者更适于描述景观对人类的效益。土地功能一词的使用以中国学者为主,但在国际研究中该词汇也有所涉及,被定义为土地系统提供的产品和服务^[22-23]。考虑到土地系统提供的产品可以被解读为生态系统供给服务,而一定尺度上的景观单元也可以被理解为土地系统单元,在实际评估中则很难严格区分土地多功能性和景观多功能性^[24]。值得注意的是,如果在土地利用研究中缺乏系统观,仅对土地利用类型进行赋值叠加,则失去了对景观格局空间关系的表达,所得出的结果不能满足格局与过程耦合原理,不宜作为景观服务^[25]。

最后,通过景观规划与设计手段优化多功能景观,是强化景观可持续性的现实途径。多功能景观与景观多功能性属于表里关系,前者是后者的空间表现单元,后者是前者的内在属性内涵^[1]。对景观多功能性的认知是通过人类价值判断而产生的,因此也需要通过利益相关者进行景观管理,根据客观需求调整景观多功能性,其外在表现形式就是多功能景观的规划与设计^[26]。尽管我国学者较早关注了多功能景观对景观可持续规划设计的意义^[27],但在目前国内景观管理实践领域仍然缺乏应用景观多功能性理论与方法进行规划设计的突出成果。在景观可持续性研究中,景观服务这一词汇可以有效链接景观格局、生态系统服务、价值、决策等可持续景观规划议题^[6]。而景观中生态系统服务之间权衡机理不明、生态系统服务与人类福祉间关联机制复杂,则成为了景观服务、景观多功能性等理论应用于可持续景观管理决策需要解决的重要瓶颈问题^[28-29]。

2 近今进展

在中国知网以“景观多功能性”或“多功能景观”为主题(检索时间 2019 年 2 月 22 日 18 时),检索得到期刊论文 68 篇,其中 2015 年以来共 28 篇。同时检索 Web of Science 核心合集,以“landscape multifunctionality”或“multifunctional landscape”为主题(筛选条件为 Article or Review),检索得到论文 1067 篇,其中 2015 年以来共 542 篇。可见景观多功能性国际研究不仅在数量上与国内研究不在同等量级,在近 3—5 年的发展趋势上也略快于国内水平。考虑到国内中文期刊涉及的研究成果相对匮乏,而一些国际期刊中的研究成果也由中国学者发表,本文在论述中主要关注国际期刊所介绍的景观多功能性研究近今进展。

2.1 农业景观多功能性

农业景观多功能性是多功能农业与生态系统服务的交叉,包含着可持续农业经营、生态学系统服务簇、土地分离与共享等学科概念,并将景观作为这些理念的空间载体^[30]。Huang 等将所对应的景观服务分为六种类型:面向消费者的服务,生态系统对农业的调节服务,农业产生的调节服务,生态系统支持服务,生态系统对农业的负服务,农业产生的负服务;其中负服务主要指农药、病虫害、养分流失等^[30]。Holt 等证明了英国现有的农药政策可以保护一系列生态系统服务,但会对英国粮食安全产生严重影响,景观多功能性仍有待提升^[31]。Smith 等通过基于生态系统服务付费方法,对澳大利亚新南威尔士的农户访谈发现,农民能够认识到

农业生产对生态系统服务可能造成的负面影响,以及保障农业景观中生态系统服务的重要价值^[32]。Bernués 等对挪威西南部的调查则显示,虽然多功能性得到广泛认知,当地农民比普通公众相对轻视旅游文化等功能,农业生产功能则受到肯定^[33]。Willemen 等在“人、植物和牲畜的空间?”一文中,详细论述了荷兰乡村耕地生产、集约畜牧、植被生境、文化休闲等功能间存在天然的冲突关系^[7];Gulickx 等在荷兰乡村的定位观测研究则表明,上述景观功能实际在局地很难出现重合,当幅度达 1 km 后则功能开始出现重叠,说明多功能的表征高度依赖于尺度^[9]。Willemen 等进一步发现,不仅空间尺度影响了多功能性的表达,景观格局随时间的演化也明显改变了多功能性^[34]。此外,Peng 等对京津冀流域尺度的农业景观多功能性多时期制图表明,多功能性的驱动因素存在高度的空间非平稳性和时间变异性,理解并刻画农业景观多功能性是一个复杂的地理问题^[35]。

当前,国际研究对农业景观多功能性的认识包括食物供给对于生态系统调节和文化服务的权衡关系、乡村利益相关者感知、多尺度的功能评估及空间关系等,良好展现了农业景观多功能性是一项典型的人地耦合研究议题,需要充分考虑农业生产活动中的生态过程与社会过程交互作用,以及在不同时空尺度上的认知差异。在明晰上述机制的前提下,有必要基于生物多样性和生态系统服务识别结果^[14],设计可持续的农业景观,降低集约化农业的负面生态、社会影响^[36],并为适应气候变化等战略目标提供景观尺度的解决方案^[37]。考虑到食物供给和生态系统调节、文化服务分别属于个人产品和公共产品,生态系统服务付费可以作为多功能农业景观形成并维持的一项有效制度保障^[38]。

2.2 城市景观多功能性

国际上对城市景观多功能性的研究包括城市郊区、城市内部等不同对象,其所关注的功能也因研究区而异。在城市角度,都市农业是一种典型的多功能景观。Yang 等发现北京郊区的农业旅游产业可以实现社会、经济和生态效益的协同,带动了城郊相对的发展^[39]。Zasada 认为,都市农业所形成的景观多功能性是由城市居民的需求所决定的,郊区农民的多功能景观管理受城市消费所驱动^[40]。Baró 等针对巴塞罗那都市区识别了基于供需框架的生态系统服务簇,并通过城乡梯度制图指引景观规划管理^[41]。Balzan 等对地中海岛屿的多功能景观城乡梯度研究表明,城市是生态系统服务容量和流量的双低值区,强化绿色基础设施是生态系统服务传递的有效途径^[42]。同时,针对城市内部的景观多功能性研究也往往以绿色基础设施为切入点。Lovell 等将植物生物多样性、粮食生产、微气候控制、土壤入渗、碳固存、视觉质量、娱乐和社会资本作为美国绿色基础设施的主要功能^[43]。Meerow 等针对底特律绿色基础设施设计了包括雨水管理、社会脆弱性、绿色空间、空气质量、城市热岛改善、景观连通性等 6 项效益在内的空间规划模型^[44]。Verdú-Vázquez 等则提出了诊断城市周边开放空间的详细操作方案,从而满足居民对多功能绿色空间的规划需求^[45]。

可见,城市景观多功能性研究与城乡生态系统服务供需关系、城市生态系统规划设计密切相关,一些国际研究充分融入了城市景观规划的相应理念。作为景观规划的本底数据支撑,更高精度的景观多功能性制图不可或缺。Peng 等形成了京津冀城市群 1 km²分辨率的多功能性制图,并以冷热点分析、逻辑斯蒂回归为手段探讨了景观多功能性成因^[46];Wu 等也选用不同的景观服务实现了 1 km²分辨率京津唐城市群景观多功能性的制图^[18];而 Liqueste 等基于生态系统服务对于欧洲多国绿色基础设施的 1 km²分辨率制图则更加充分的满足了区域跨国景观管理的诉求^[47]。然而,虽然城乡景观服务供给的空间表达手段不断完善,景观服务需求在城市空间识别的依然是研究难点。基于访谈手段的景观服务需求测度往往仅能满足城市局地社区的多功能景观设计^[48],认识生态系统服务在城乡梯度间的空间流动已成为较大尺度景观规划的重要知识需求^[41-42]。

2.3 景观多功能性的区域特色

景观多功能性与人类活动密切相关,除了学界关注较多的农业景观和城市景观外,一些特定的景观管理方式也与当地的区域发展密切相关,展现为农业和城市以外其他景观的区域特色。山区林业经济的发展使森林多功能景观为当地所关注。Carvalho-Ribeiro 等对葡萄牙北部的社区访谈发现,用户群体、可持续性参与者和林业机构对森林景观的管理意图存在分歧,营造多功能景观需要首先向利益相关者展现预期的可持续景观

情景^[49]。Irauschek 等考虑到中欧森林管理者对景观非木材服务的兴趣日增,将木材生产、碳固存、生物多样性和重力灾害防范作为主要景观服务,预判了奥地利东阿尔卑斯山多功能景观对气候变化的适应能力^[50]。Lovell 等发现北美的农林复合经营时对木本植物生产力关注不足,认为有必要进行木本植物种植组合试验,从而提升景观多功能性,应对气候变化与粮食安全需求^[51]。在局地尺度,有必要对景观要素特征进行细化,如 Tziliavakis 等基于 350 篇文献构建生态焦点区评价指标体系,用于评估梯田、沟渠、水塘、缓冲带、独木、固氮作物等 20 种景观要素的多种生态效益^[52]。而在国家尺度上,景观多功能性研究有必要关注不同区位景观主导功能的差异性^[10-12]。Turner 等基于生态系统服务制图将丹麦多功能景观分为专业化农业生产型、沿海文化服务型、城市周边混合功能型和高狩猎潜力的森林游憩型^[53];其中作为一项区域特色,Lund 等在丹麦的研究表明,狩猎活动可以激励土地所有者保留和创造更多类型的景观要素,从而有助于景观多功能性的形成^[54]。

基于区域特色把握景观多功能性,考虑具体利益相关者的景观管理诉求,明晰多功能景观构建方向,被国际景观多功能性研究所强调。依托可持续景观设计强化景观多功能性,从而提升生态系统服务与人类福祉,已经逐渐进入政策决策与地方实践层面^[55]。一些土地利用预测模型的研发更为多功能景观的管理决策提供了重要的情景预测依据^[56]。景观研究可以在空间上有效链接生态和社会系统,从而支撑多功能景观构建所需要的生态、社会多目标规划^[57]。而为了从景观多功能性的理论认知走向景观可持续性的实践需求,则需要根据区域生态系统与社会系统的运行特征与交互作用方式,形成格局-过程-服务-可持续性的级联研究链条,在景观尺度上开展区域人地耦合系统集成研究^[58-59]。

3 前沿议题

针对中国景观多功能性研究滞后于国际研究水平,对区域人类福祉提升支持作用不足的问题,亟待明确景观多功能性研究的前沿议题,缩小国内外学科研究差距并有效服务于国家发展需求。基于对研究近今进展的总结,本文将景观多功能性研究的前沿议题分解为指标方法、机理规律、学科贡献、国家需求 4 个方面,即:基于供需原理优化景观功能评估指标与方法,正确认知景观功能主导性与多样性的关系,探究可持续发展目标达成的多目标协同途径,为国土空间优化提供理论、方法与实践指引,如图 2 所示。

3.1 基于供需原理优化景观功能评估指标与方法

总结近年来景观多功能性评估的技术方法,发现基于不同尺度、依托土地利用等空间数据的景观服务制图正在趋于完善^[60]。随着海量对地观测数据的获取与加工,景观服务的制图精度将逐步提升。从功能供给角度评估自然环境所提供的景观多功能性,其技术难度将随之降低。但是,景观多功能性一词体现了人类对景观赋予的价值判断,自然环境所提供的景观服务未必被本地居民所消费,而剥离利益相关者的价值无从谈起。因此,景观功能评估有必要依托生态系统服务供需原理进行改良。

近年来,一些国际研究开始关注生态系统服务需求制图^[61],对生态系统服务供需关系的空间表征取得一定进展^[42,62],但此类研究大多基于较为精细的统计资料评估社会需求。当前,用于描述社会行为的大数据已被广泛应用于地理学研究中^[59],利益相关者的空间活动轨迹得到了更精准的刻画。随着社会过程空间化技术手段的提升,从功能需求角度评估人类社会所需要的景观多功能性将逐步实现。分解域内域外需求、消费者与生产者需求、短期与长期需求,将为可持续景观规划提供重要的时空依据。

在明晰生态系统服务供需特征的基础上,把握生态系统服务在景观中的空间流动进而成为景观多功能性评估模型研发的目标^[63]。生态系统服务流分为原位流、全向流、方向流等,其中方向流的刻画是生态系统服务流建模重点。为刻画生态系统服务流,首先需要将生态系统服务供需换算至同一计量单位,测度供给量和需求量的规模匹配程度;其次需要准确判断流动的空间载体及路径,并明确物质传递时间以确定流速;最后设置相应的规划情景,提出利益相关者供需匹配的多功能景观建设方案。依托基于供需原理的景观功能评估模型的研发,为多功能景观形成机理分析提供充分技术保障。

3.2 正确认知景观功能主导性与多样性的关系

近年来的大量景观多功能性、生态系统服务簇研究已经证实,一些景观功能之间天然具有此消彼长的属

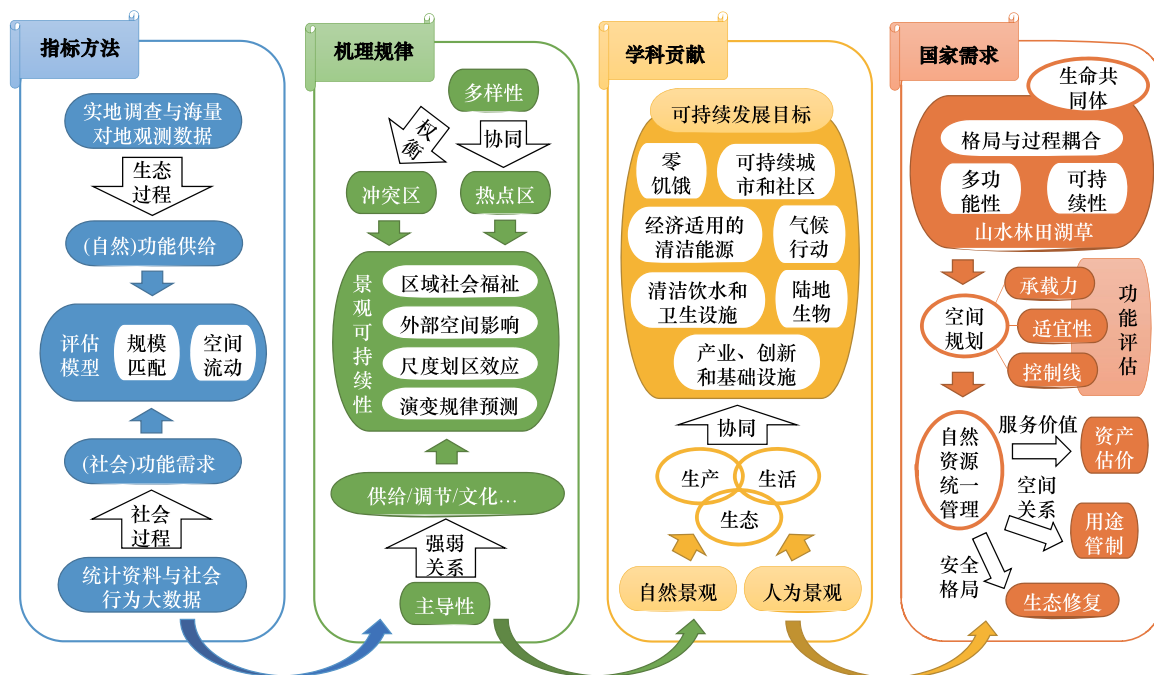


图2 景观多功能性研究的前沿议题

Fig.2 The frontier issues in landscape multifunctionality research

性,并不能在某一区域内全部达到极值^[31]。因此,在生态系统服务簇的刻画中有必要融入评价者对地域分异规律的基本认知,根据区域特色确定景观多功能性的研究范畴^[64]。虽然景观功能间的权衡协同关系已经在近十年的国际研究中得以广泛刻画,但依然未能对供给、调节、文化等景观服务类型间的天然对立关系在地域分异规律层面作出明确解读。显然,在局地点位上某种生态系统或土地类型是具备明确功能属性的,但在区域层面不同景观要素相互交织,便产生了主导性和多样性的问题。

主导性是指供给、调节、文化等景观服务在空间中呈现的强弱关系,往往会有一种或少数几种景观服务代表了整个景观的特征;而多样性是指上述服务往往同时存在于某一空间中,并通过权衡关系体现为冲突区,通过协同关系体现为热点区。显然主导性和多样性会同时存在于较大尺度的空间中,景观服务的多度或者热点只能体现景观功能的多样性,却忽视了景观主导功能对区域发展的意义,显然是有失偏颇的计量方式。以提升景观可持续性为目标,需要更加深入的理解景观功能主导性与多样性在空间中的关系。

认知区域社会福祉是理解景观功能关联规律的前提,城市、乡村、山地、海岸不同的地域特征影响了社会福祉提升对多功能景观的具体需求。区域外部空间对区域内部景观功能存在的影响也不可忽视,农牧业产品的区际联系、国际联系正在不断加强。尺度效应和划区效应直接影响了景观功能的组合特征,需要依循规划目标确立合适的尺度范围和划区依据^[65]。此外,气候与土地利用变化将直接影响景观功能的组合关系,准确预测多功能景观演变规律是明晰景观可持续性的重要环节。集成自然特征、景观服务、气候变化和社会发展的功能区划则可以作为认知景观多功能性和管理景观可持续性的有效途径^[66-68]。

3.3 探究可持续发展目标达成的多目标协同途径

2030 可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDG)的提出为景观可持续性提升提供了明确方向。但 Gao 等对澳大利亚土地系统的模拟结果显示,鉴于可持续发展目标实施的复杂性以及资源限制下土地系统中普遍存在的权衡关系,同时实现多个目标的情况非常少见,土地与能源、粮食、水资源的协同管理亟待强化^[69]。森林、湿地等自然景观与农田、城市等人为景观在空间上相结合,构成了生活、生产、生态三种不同用途的国土空间,正是景观多功能性的现实体现。上述能源、粮食、水资源管理恰恰对应了生活、生产、生态不同的国土空间,形成了土地可持续发展目标与其他可持续发展目标的联结。

在 SDG 的 17 项目标中,7 项目标可以被认为直接关联于景观多功能性。SDG2 零饥饿倡导可持续农业,这正是景观多功能性概念形成时的初始目标。SDG6 清洁饮水和卫生设施聚焦水资源与水环境,河流、湖泊和湿地景观功能及其周边耕地、林地和草地景观功能间的交互作用值得高度关注。SDG7 经济适用的清洁能源与风力水利和太阳能设施息息相关,是一种新型景观服务类型^[70]。SDG8 产业、创新和基础设施以及 SDG11 可持续城市和社区代表了可持续的城市化和工业化,对应目标下景观可持续的形成需要依靠城市多功能景观的塑造。SDG13 气候行动与各种类型景观的多功能性均关联密切,其既考虑自然景观更高效的发挥碳汇功能,也涉及人文景观更有效的控制碳排放。SDG15 陆地生物则直接涵盖了景观生态学的大部分研究主题,多功能景观的构建将成为该目标达成的根本保障。

景观多功能性的学科价值不仅反映在 SDG 目标内容上,更体现在 SDG 目标的协同实现路径上。农药化肥的大量使用有助于零饥饿目标的部分达成,但对清洁饮水和陆地生物目标造成明显影响,显然不满足景观可持续性的需求。工业、基础设施建设和可持续城市建设需要更加经济适用的清洁能源,而乡村清洁能源的设施建设和城市可持续社区建设构成了良好的多功能景观城乡梯度。气候行动和陆地生物在大多数状态下呈现协同关系,但二者目标的保障不能以牺牲零饥饿目标为代价,主导景观功能的取舍有必要在区域尺度更加明确。通过寻求合适的多功能景观建设方案,实现多种 SDG 目标在空间上的协同达成,是景观多功能性走向景观可持续性的关键路径。

3.4 指引国土空间优化理论、方法与实践

山水林田湖草是一个生命共同体,对上述景观要素的系统治理是国家生态文明建设的重要任务。在理论层面,“人的命脉在田,田的命脉在水,水的命脉在山,山的命脉在土,土的命脉在树”通俗的阐释了“水-土-气-生-人”要素在地域空间中的交互作用,蕴含了格局与过程耦合研究中的诸多关键议题^[25,71]。“水-土-气-生”等自然要素与人类福祉通过生态系统服务相链接^[29],在地域空间上表现为景观多功能性,是景观生态学视角对生命共同体思想的有力阐释。当国土空间开发与保护过程中遵循自然规律,平衡生态环境保护与经济发展、资源利用的关系时,才能在经济社会和生态环境各个维度实现景观可持续性^[6,72]。

形成“多规合一”的空间规划是当前我国国土空间优化的焦点议题。为科学划定城镇、农业、生态空间以及生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界,亟需研发资源环境承载力和国土空间开发适宜性评价的新方法,更有效的达成承载力和适宜性评价的指标体系完整性和空间位置精准性。承载力和适宜性在语义上均与功能、需求密切相关,其不仅在概念体系上与景观多功能性研究相重合,并且在具体评估途径上可以借助景观多功能性识别方法。尤其是景观多功能性研究在供需、权衡等空间要素相互关系刻画上具有方法优势,可以为控制线的划定提供从格局识别到功能评估的多方面支撑。

中国景观生态学的发展一直与国家发展需求紧密结合,景观服务、景观多功能性与景观可持续性是中国景观生态学服务于国民经济发展和国土生态安全的重要研究方向^[73]。面向自然资源统一管理中自然资源资产评估、国土空间用途管制、国土空间生态修复等多项实践需求,景观多功能性研究成果可以与国家和区域自然资源管理实践有机结合,通过生态系统服务价值核算^[21]、景观服务制图与功能区划^[74]、生态安全格局构建^[75]等途径,识别多功能景观并塑造可持续景观,为资产管理、用途管制、生态修复等目标提供切实方案,为加快推进生态文明建设提供有力的学科支持。

参考文献 (References):

- [1] 彭建, 吕慧玲, 刘焱序, 陈昕, 胡晓旭. 国内外多功能景观研究进展与展望. 地球科学进展, 2015, 30(4): 465-476.
- [2] Mastrangelo M E, Weyland F, Villarino S H, Barral M P, Nahuelhual L, Latorra P. Concepts and methods for landscape multifunctionality and a unifying framework based on ecosystem services. Landscape Ecology, 2014, 29(2): 345-358.
- [3] Soini K. Exploring human dimensions of multifunctional landscapes through mapping and map-making. Landscape and Urban Planning, 2001, 57(3/4): 225-239.
- [4] O'Farrell P J, Anderson P M L. Sustainable multifunctional landscapes: a review to implementation. Current Opinion in Environmental

- Sustainability, 2010, 2(1/2): 59-65.
- [5] Termorshuizen J W, Opdam P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development. *Landscape Ecology*, 2009, 24(8): 1037-1052.
- [6] Wu J G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 999-1023.
- [7] Willemen L, Hein L, van Mensvoort M E F, Verburg P H. Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1): 62-73.
- [8] Kienast F, Bolliger J, Potschin M, de Groot R S, Verburg P H, Heller I, Wascher D, Haines-Young R. Assessing landscape functions with broad-scale environmental data: insights gained from a prototype development for Europe. *Environmental Management*, 2009, 44(6): 1099-1120.
- [9] Gulickx M M C, Verburg P H, Stoorvogel J J, Kok K, Veldkamp A. Mapping landscape services: a case study in a multifunctional rural landscape in the Netherlands. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 273-283.
- [10] Hermann A, Kuttner M, Hainz-Renetzeder C, Konkoly-Gyuró É, Tirászi Á, Brandenburg C, Allex B, Ziener K, Wrška T. Assessment framework for landscape services in European cultural landscapes: an Austrian Hungarian case study. *Ecological Indicators*, 2014, 37: 229-240.
- [11] Ungaro F, Zasada I, Piore A. Mapping landscape services, spatial synergies and trade-offs. A case study using variogram models and geostatistical simulations in an agrarian landscape in North-East Germany. *Ecological Indicators*, 2014, 46: 367-378.
- [12] Queiroz C, Meacham M, Richter K, Norström A V, Andersson E, Norberg J, Peterson G. Mapping bundles of ecosystem services reveals distinct types of multifunctionality within a Swedish landscape. *Ambio*, 2015, 44 Suppl 1: 89-101.
- [13] Stürck J, Verburg P H. Multifunctionality at what scale? A landscape multifunctionality assessment for the European Union under conditions of land use change. *Landscape Ecology*, 2017, 32(3): 481-500.
- [14] Frei B, Renard D, Mitchell M G E, Seufert V, Chaplin-Kramer R, Rhemtulla J M, Bennett E M. Bright spots in agricultural landscapes: identifying areas exceeding expectations for multifunctionality and biodiversity. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(6): 2731-2743.
- [15] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 苏常红, 姚雪玲, 刘宇. 国际景观生态学研究新进展. *生态学报*, 2008, 28(2): 798-804.
- [16] 周华荣. 干旱区湿地多功能景观研究的意义与前景分析. *干旱区地理*, 2005, 28(1): 16-20.
- [17] 吕一河, 马志敏, 傅伯杰, 高光耀. 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估. *生态学报*, 2013, 33(4): 1153-1159.
- [18] Wu J S, Feng Z, Gao Y, Peng J. Hotspot and relationship identification in multiple landscape services: a case study on an area with intensive human activities. *Ecological Indicators*, 2013, 29: 529-537.
- [19] Fry G L A. Multifunctional landscapes—towards transdisciplinary research. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 57(3/4): 159-168.
- [20] Jax K. Function and “functioning” in ecology: what does it mean? *Oikos*, 2005, 111(3): 641-648.
- [21] 刘焱序, 傅伯杰, 赵文武, 王帅. 生态资产核算与生态系统服务评估: 概念交汇与重点方向. *生态学报*, 2018, 38(23): 8267-8276.
- [22] Verburg P H, van de Steeg J, Veldkamp A, Willemen L. From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(3): 1327-1335.
- [23] Paracchini M L, Pacini C, Jones M L M, Pérez-Soba M. An aggregation framework to link indicators associated with multifunctional land use to the stakeholder evaluation of policy options. *Ecological Indicators*, 2011, 11(1): 71-80.
- [24] Liu C, Xu Y Q, Huang A, Liu Y X, Wang H, Lu L H, Sun P L, Zheng W R. Spatial identification of land use multifunctionality at grid scale in farming-pastoral area: a case study of Zhangjiakou City, China. *Habitat International*, 2018, 76: 48-61.
- [25] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. *地理学报*, 2014, 69(8): 1052-1059.
- [26] 汤茜, 丁圣彦. 多功能景观研究进展. *生态学报*, 2014, 34(12): 3151-3157.
- [27] 王紫雯. 多功能景观概念在可持续景观规划中的运用. *城市规划*, 2008, 32(2): 27-33.
- [28] 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.
- [29] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151.
- [30] Huang J, Tichit M, Poulot M, Darly S, Li S C, Petit C, Aubry C. Comparative review of multifunctionality and ecosystem services in sustainable agriculture. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 138-147.
- [31] Holt A R, Alix A, Thompson A, Maltby L. Food production, ecosystem services and biodiversity: we can't have it all everywhere. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 1422-1429.
- [32] Smith H F, Sullivan C A. Ecosystem services within agricultural landscapes—farmers' perceptions. *Ecological Economics*, 2014, 98: 72-80.
- [33] Bernués A, Rodríguez-Ortega T, Alfnes F, Clemetsen M, Eik L O. Quantifying the multifunctionality of fjord and mountain agriculture by means of sociocultural and economic valuation of ecosystem services. *Land Use Policy*, 2015, 48: 170-178.
- [34] Willemen L, Veldkamp A, Verburg P H, Hein L, Leemans R. A multi-scale modelling approach for analysing landscape service dynamics. *Journal*

- of Environmental Management, 2012, 100: 86-95.
- [35] Peng J, Liu Y X, Liu Z C, Yang Y. Mapping spatial non-stationarity of human-natural factors associated with agricultural landscape multifunctionality in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 246: 221-233.
- [36] Landis D A. Designing agricultural landscapes for biodiversity-based ecosystem services. *Basic and Applied Ecology*, 2017, 18: 1-12.
- [37] Von Haaren C, Saathoff W, Galler C. Integrating climate protection and mitigation functions with other landscape functions in rural areas: a landscape planning approach. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2012, 55(1): 59-76.
- [38] Nilsson L, Andersson G K S, Birkhofer K, Smith H G. Ignoring ecosystem-service cascades undermines policy for multifunctional agricultural landscapes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2017, 5: 109.
- [39] Yang Z S, Cai J M, Sliuzas R. Agro-tourism enterprises as a form of multi-functional urban agriculture for peri-urban development in China. *Habitat International*, 2010, 34(4): 374-385.
- [40] Zasada I. Multifunctional peri-urban agriculture—A review of societal demands and the provision of goods and services by farming. *Land Use Policy*, 2011, 28(4): 639-648.
- [41] Baró F, Gómez-Baggethun E, Haase D. Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: Insights for landscape planning and management. *Ecosystem Services*, 2017, 24: 147-159.
- [42] Balzan M V, Caruana J, Zammit A. Assessing the capacity and flow of ecosystem services in multifunctional landscapes: evidence of a rural-urban gradient in a Mediterranean small island state. *Land Use Policy*, 2018, 75: 711-725.
- [43] Lovell S T, Taylor J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [44] Meerow S, Newell J P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 159: 62-75.
- [45] Verdú-Vázquez A, Fernández-Pablos E, Lozano-Diez R V, López-Zaldívar Ó. Development of a methodology for the characterization of urban and periurban green spaces in the context of supra-municipal sustainability strategies. *Land Use Policy*, 2017, 69: 75-84.
- [46] Peng J, Chen X, Liu Y X, Lü H L, Hu X X. Spatial identification of multifunctional landscapes and associated influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Applied Geography*, 2016, 74: 170-181.
- [47] Lique C, Kleeschulte S, Dige G, Maes J, Grizzetti B, Olah B, Zulian G. Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: a Pan-European case study. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 268-280.
- [48] Yang B, Li M H, Li S J. Design-with-nature for multifunctional landscapes: environmental benefits and social barriers in community development. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 10(11): 5433-5458.
- [49] Carvalho-Ribeiro S M, Lovett A, O'Riordan T. Multifunctional forest management in Northern Portugal: moving from scenarios to governance for sustainable development. *Land Use Policy*, 2010, 27(4): 1111-1122.
- [50] Irauschek F, Rammer W, Lexer M J. Can current management maintain forest landscape multifunctionality in the Eastern Alps in Austria under climate change? *Regional Environmental Change*, 2017, 17(1): 33-48.
- [51] Lovell S T, Dupraz C, Gold M, Jose S, Revord R, Stanek E, Wolz K J. Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agroforestry Systems*, 2018, 92(5): 1397-1415.
- [52] Tziliavakis J, Warner D J, Green A, Lewis K A, Angileri V. An indicator framework to help maximise potential benefits for ecosystem services and biodiversity from ecological focus areas. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 859-872.
- [53] 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.
- [54] Lund J F, Jensen F S. Is recreational hunting important for landscape multi-functionality? Evidence from Denmark. *Land Use Policy*, 2017, 61: 389-397.
- [55] Dosskey M, Wells G, Bentrup G, Wallace D. Enhancing ecosystem services: designing for multifunctionality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 67(2): 37A-41A.
- [56] Brown I, Castellazzi M. Scenario analysis for regional decision-making on sustainable multifunctional land uses. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(4): 1357-1371.
- [57] Freeman O E, Duguma L A, Minang P A. Operationalizing the integrated landscape approach in practice. *Ecology and Society*, 2015, 20(1): 24.
- [58] Fu B J, Wei Y P. Editorial overview: keeping fit in the dynamics of coupled natural and human systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: A1-A4.
- [59] 傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. *地理学报*, 2017, 72(11): 1923-1932.
- [60] Fu B J, Zhang L W, Xu Z H, Zhao Y, Wei Y P, Skinner D. Ecosystem services in changing land use. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15

- (4): 833-843.
- [61] Hamann M, Biggs R, Reyers B. Mapping social-ecological systems: identifying ‘green-loop’ and ‘red-loop’ dynamics based on characteristic bundles of ecosystem service use. *Global Environmental Change*, 2015, 34: 218-226.
- [62] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521-535.
- [63] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. *生态学报*, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [64] 李双成, 王珏, 朱文博, 张津, 刘娅, 高阳, 王阳, 李琰. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. *地理学报*, 2014, 69(11): 1628-1639.
- [65] Malinga R, Gordon L J, Jewitt G, Lindborg R. Mapping ecosystem services across scales and continents: A review. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 57-63.
- [66] Liu Y X, Fu B J, Wang S, Zhao W W. Global ecological regionalization: from biogeography to ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 1-8.
- [67] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武. 从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展. *生态学报*, 2017, 37(23): 7761-7768.
- [68] Peng J, Hu X X, Qiu S J, Hu Y N, Meersmans J, Liu Y X. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 765-775.
- [69] Gao L, Bryan B A. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability. *Nature*, 2017, 544(7649): 217-222.
- [70] Li Y, Kalnay E, Motesharrei S, Rivas J, Kucharski F, Kirk-Davidoff D, Bach E, Zeng N. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation. *Science*, 2018, 361(6406): 1019-1022.
- [71] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. *生态学报*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [72] 赵文武, 房学宁. 景观可持续性与景观可持续性科学. *生态学报*, 2014, 34(10): 2453-2459.
- [73] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 肖笃宁, 赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. *生态学报*, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [74] Liu Y X, Fu B J, Zhao W W, Wang S, Deng Y. A solution to the conflicts of multiple planning boundaries: landscape functional zoning in a resource-based city in China. *Habitat International*, 2018, 77: 43-55.
- [75] 陈利顶, 景永才, 孙然好. 城市生态安全格局构建: 目标、原则和基本框架. *生态学报*, 2018, 38(12): 4101-4108.