

DOI: 10.5846/stxb201801160119

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研究. 生态学报, 2018, 38(18): - .

Liu L Y, Bian Z Q, Ding S Y. Effects of landscape spatial heterogeneity on the generation and provision of ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

景观空间异质性对生态系统服务形成与供给的影响研究

刘绿怡^{1,2}, 卞子元^{1,2}, 丁圣彦^{1,2,*}

1 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

2 河南大学环境与规划学院, 开封 475004

摘要:景观空间异质性与生态系统服务的关系极为密切,适当调整景观空间异质性有助于生态系统服务的持续形成与稳定供给。研究景观空间异质性和生态系统服务形成与供给之间的相互影响作用及响应机制具有重要的理论与现实意义,是保护生物多样性、管理生态系统服务与优化景观空间配置的基础。现有研究大多在不同尺度上探讨了景观格局与生态过程或生态系统服务间的相互影响关系,而缺乏景观格局-生态过程-生态系统服务三者间有效联结等方面的研究。景观空间异质性是怎样直接或间接地作用于生态系统服务形成与供给的,目前还没有一个较为明确的解释。因此,通过分析国内外文献,回顾了景观格局或景观空间异质性与生态系统服务之间关系的研究进展、研究内容和研究方法;从景观组成、景观构型的变化入手,讨论了景观空间异质性对生态系统服务形成与供给的影响及其强度,并认为景观组成异质性变化能够直接影响生态系统服务,而景观构型异质性变化会通过改变生态过程而间接影响生态系统服务;阐述了景观空间异质性在影响生态系统服务形成与供给的同时,也使生态系统服务在空间上产生了异质性分布,并从自然因素和人为因素两个方面对其进行解释;强调了尺度问题在景观空间异质性与生态系统服务研究中的重要性;最后,明确了对生态系统服务形成与供给的景观空间异质性影响研究不仅有助于生态系统服务的维持与调节,也能更深层次地揭示其中的生态学意义。

关键词:生态系统服务;景观空间异质性;景观组成;景观构型;研究进展

Effects of landscape spatial heterogeneity on the generation and provision of ecosystem services

LIU Lyuyi^{1,2}, BIAN Ziqi^{1,2}, DING Shengyan^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Henan University, Ministry of Education, Kaifeng 475004, China

2 College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Landscape spatial heterogeneity is intimately related to ecosystem services. Appropriately modifying landscape spatial heterogeneity can be beneficial in terms of the continuous generation and stabilized provision of ecosystem services. Research on the interaction and response mechanism between landscape spatial heterogeneity and ecosystem service generation and provision yield information of substantial theoretical and practical value, and also provide an essential foundation for biodiversity conservation, ecosystem service management, and landscape spatial optimization. Although previous studies have mainly discussed the interactions between landscape patterns and ecological process or ecosystem services, there has been relatively little attention paid to effective connections among landscape patterns, ecological processes, and ecosystem services. Consequently, it remains unclear how landscape spatial heterogeneity directly or

基金项目:国家自然科学基金项目(41771202)

收稿日期:2018-01-16; 修订日期:2018-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: syding@henu.edu.cn

indirectly affect the generation and provision of ecosystem services. Therefore, on the basis of existing literature, we reviewed the progress, content and methods of research on the relationship between landscape pattern or landscape spatial heterogeneity and ecosystem services. Starting with the variation in landscape composition and configuration, we discuss the effects of landscape spatial heterogeneity on the generation and provision of ecosystem services. We accordingly propose that changes in landscape compositional heterogeneity can affect ecosystem services directly, whereas changes in landscape configurational heterogeneity can affect ecosystem services indirectly through altering ecological process. When landscape spatial heterogeneity affects the generation and provision of ecosystem services, it simultaneously results in a more heterogeneous distribution of ecosystem services. This phenomenon can be explained in terms of both natural and anthropogenic factors. The importance of scale effects in the research on landscape spatial heterogeneity and ecosystem services is also emphasized. Understanding the effect of landscape spatial heterogeneity on the generation and provision of ecosystem services can not only contribute to sustaining and regulating ecosystem services but also reveal the underlying ecological principles associated with these interactions.

Key Words: ecosystem service; landscape spatial heterogeneity; landscape composition; landscape configuration; research progress

生态系统服务是多学科交叉命题, 现已成为生态学、地理学、环境科学与经济学等学科的研究热点^[1-2]。2016年生态与环境科学领域的十大热点前沿中, 生态系统服务研究位列第三^[3]。目前, 与生态系统服务相关的研究不仅包括生态系统服务的分类、价值评估、权衡与协同、服务的传递与流动等^[4], 也涵盖了生态过程、生态系统功能等机理探究, 与生态系统管理等决策性研究^[5]。

生态系统服务的形成过程贯穿了自然环境系统和社会系统^[6]。随着生态系统服务的评估与管理逐步由生态系统尺度向景观尺度推进^[7], 生态系统服务也成为景观生态学关注的重点方向。景观生态学的研究核心为景观格局与生态过程间的相互作用及其尺度效应^[8-9], 与生态系统和生态过程的关系非常类似。在生态系统水平上, 生态系统属性与生态过程在时空上的维持形成生态系统的基本功能^[10], 而人类对生态系统功能加以使用, 赋予其价值, 便形成了生态系统服务^[11]。2017年美国景观生态学年会的主题为“人-地-格局: 连接景观异质性与社会-环境系统”, 并提出今后需加强“景观格局-生态过程-生态系统服务”的多尺度综合集成研究^[12], 显示出探讨景观空间异质性与生态系统服务之间关系的迫切性与必要性。

景观空间异质性是景观生态学的核心概念。最新研究表明, 景观尺度是研究生态系统服务的更佳尺度, 在该尺度上开展研究不仅有助于理解生物多样性、生态系统功能与生态系统服务间的关系, 解决生态系统服务形成与维持等难题^[13-14], 而且能够在景观管理中优化生态系统服务的生产能力^[15-18], 具有重要的理论与实践意义。因此, 本文通过总结与梳理国内外文献, 探讨了景观空间异质性与生态系统服务的关联, 并从景观组成和景观构型两方面入手, 分析了景观空间异质性变化对生态系统服务形成与供给的影响, 讨论了在这些影响下生态系统服务产生空间异质性分布的原因, 并解释了尺度效应在景观空间异质性与生态系统服务研究中的重要性。

1 景观空间异质性与生态系统服务

1.1 二者之间的关系

景观空间异质性是指不同类型和数量的景观组成单元在空间分布上的不均匀性及复杂程度^[19], 它分为景观组成异质性和景观构型异质性^[20]。景观组成异质性体现了景观组成类型(或土地利用/覆被类型)的差异, 而景观构型异质性体现的是不同景观组成类型的空间配置和组合方式差异^[21]。二者的区别在于, 景观组成异质性变化表现为不同景观组成类型数量或均匀度的变化, 而景观构型异质性变化则表现为空间格局复杂程度的变化(图1)^[22]。

景观空间异质性是生态过程和景观功能的基础与驱动力。异质性景观不仅为人类提供了多种生态系统服务,还决定了生态系统服务的多样性和稳定性^[23-24]。景观空间异质性会影响物质、能量和信息在景观中的流动与传播,其程度愈高,一方面体现了景观内大的镶嵌体及其内部物种的减少,另一方面将引起边缘生境及边缘物种数量的增加^[25]。这将导致种群维持^[26-29]、物种互动、生物群落组成^[30]及部分生态过程^[31-32]等发生变化,最终不仅影响到生态系统服务的形成和生产能力^[8,33-34],也使生态系统服务在空间上的分布具有了异质性特征^[35]。可见,景观空间异质性与生态系统服务可持续性的关系极为密切^[36],且对生态系统服务的形成与供给具有重要影响。

1.2 二者关系的研究内容与方法

目前,与景观空间异质性和生态系统服务之间关系的相关研究有生态系统服务价值的异质性分布^[37-40],以及景观格局变化、土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响^[41-48]等,另外也不乏探讨景观空间异质性与生物多样性之间关系的研究^[26,29,49]。现有研究大多将生态系统服务量化,如,计算生态系统服务的价值或测定生态系统服务的代表性指标(表 1),并将量化后的生态系统服务与能够表征景观空间异质性变化的变量进行统计分析,从而来证实两者间的关系及相互作用情况^[61]。

表 1 部分生态系统服务的代表性指标

Table 1 Representative index of partial ecosystem services

生态系统服务 Ecosystem services	代表性指标 Representative index	文献来源 References
淡水供给 Fresh water supply	地下水补给量,水源供给量(模型估算)等	[50-52]
水源质量 Water quality	总磷、氨氮、化学需氧量、五日生化需氧量、溶解氧等的质量浓度,浊度, pH 等	[50,53]
水源调节 Water regulation	降雨与径流的变异系数,最大潜在可利用水量(降水量减去蒸散量)等	[54-55]
空气质量调节 Air quality regulation	二氧化硫,二氧化氮,可吸入颗粒物等的质量浓度	[56-57]
传粉 Pollination	传粉昆虫多样性,物种丰富度等	[26,58]
土壤保持 Soil conservation	土壤保持量,土壤养分保持量等	[59-60]

1.2.1 制图分析

生态系统服务制图能够可视化呈现多种生态系统服务的空间特征及其相互关系。使用遥感和社会经济等代理数据或实际观测、调查所得的原始数据,运用核查表法、多变量因果关系法、插值法或回归分析法等进行制图,可直观地反映生态系统服务在空间上的异质性分布^[1](表 2)。

1.2.2 相关性分析

将景观指数与生态系统服务的价值或代理性指标进行相关性分析,是探讨景观空间异质性与生态系统服务间动态变化关系的研究方法之一。景观指数高度浓缩了景观格局信息,简化反映了景观结构组成、空间配置特征等指标,包括了景观单元特征指数和景观整体特征指数,可涵盖多样性指数、镶嵌度指数、距离指数及生境破碎化指数等^[19]。

刘琳等^[41]通过计算景观指数,得到研究时间内研究区各景观组成类型的面积变化趋势,并与研究区内主

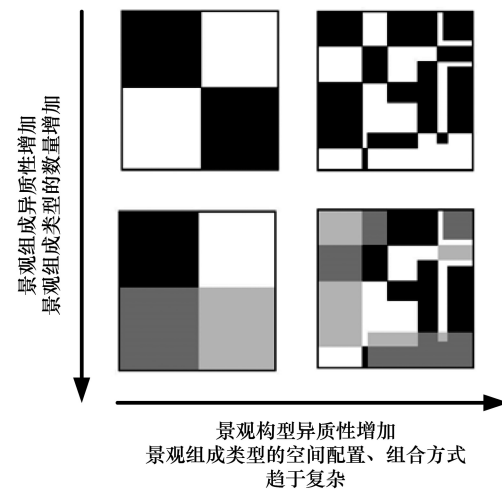


图 1 景观组成异质性与景观构型异质性变化趋势示意图^[22]

Fig.1 Illustration of variations of landscape compositional heterogeneity and landscape configurational heterogeneity^[22]

要生态系统服务的价值进行相关性分析。其结果显示,研究区林、草生态系统面积的增加与生态系统服务价值提高呈正相关,而生态系统服务价值的提高也反映出主要生态系统服务(土壤形成与保护、废物处理、生物多样性保护及气候调节等)形成与供给的提升。Hao 等^[42]证实了这一结论,并认为林、草生态系统面积的增加有利于改善生态环境、提高生态系统提供服务的能力。水文生态系统服务对农业扩张、城市化等景观变化尤为敏感^[63],因此在水文生态系统服务与景观格局的空间耦合关系研究中,分析生态系统服务的代表性指标与景观指数之间相关性的研究方法得到普遍应用^[53]。以水源质量服务为例,研究表明景观空间异质性程度能够较好地解释水源质量指标的变化^[53,64]。不同景观组成类型对非点源污染的承载力存在差异,与之相应的景观指数也与水源质量指标存在不同的相关性,如,边缘密度与溶解氧的质量浓度呈负相关,而与其他水源质量指标呈正相关。

表 2 生态系统服务的主要制图方法^[1,62]
Table 2 Principal mapping methods of ecosystem services^[1,62]

制图方法 Mapping methods	所需数据类型 Data types	适用的生态系统服务 Applicable ecosystem services
基于覆盖研究区的典型抽样 Based on the typical sampling that covered the whole study area	原始数据	生物多样性 渔业生产 水源质量
基于研究区抽样数据的模拟 Based on the simulation of sampling data in study area	原始数据	碳储存 生物多样性 农业生产 传粉 土壤保持
基于土地利用/覆被情况 Based on the situation of land use/land cover	代理数据	碳储存 生物多样性 土壤保持
基于一系列因果关系 Based on a series of causal relationship	代理数据	淡水供给 水源调节 土壤形成

这些研究证实了景观空间异质性与生态系统服务间的相关性关系,也反映出景观空间异质性变化对生态系统服务形成与供给的重要性。

1.2.3 敏感性分析

土地利用/覆被变化包括景观空间面貌的改变以及景观中生态过程的时空变化^[19],它体现了景观空间异质性的替代过程^[12],是景观格局变化的具体表现。土地利用/覆被变化最直接地反映了人与自然的相互影响关系,与生态系统服务联系紧密^[5,65-66]。

土地利用/覆被变化通过改变景观连接度对生态系统服务产生了直接或间接地影响,而生态系统服务的价值对不同土地利用类型的敏感程度亦不相同^[46,60]。Eziz 等^[46]认为生态系统服务价值对湿地、草地等土地利用类型的变化较为敏感,而对沙地的变化不敏感。该研究中,研究区大部分湿地、草地转变为农田,造成生态系统服务价值的下降;沙地向其他土地利用类型转移的面积虽大,却对生态系统服务价值的影响不甚明显。然而,土地利用/覆被变化与生态系统服务的敏感程度呈非线性关系,当某种土地利用类型的变化超出一定范围时,不仅不会促进生态系统服务的形成,反而会抑制生态系统提供服务的能力。以土壤保持服务为例,草地适当地转变为林地和农田有利于土壤保持服务的形成和提高,然而当草地退化超出一定阈值时,会削弱天然植被的稳定性,在风力作用下造成潜在荒漠化,使土壤保持服务下降^[60]。

土地利用/覆被变化与生态系统服务的敏感性分析不仅反映出生态系统服务对不同土地利用类型变化的敏感程度^[46-48],也侧面体现了不同土地利用类型提供生态系统服务的能力是有所差异的。

2 景观空间异质性对生态系统服务形成与供给的影响

景观空间异质性在生态系统服务的形成与供给中具体扮演了何种角色、做出了怎样的贡献,仍缺乏更为

深入地讨论^[34,50]。有研究认为,景观组成的变化会直接影响生态系统服务的空间分布,而景观构型的变化能够通过改变生态过程而间接作用于生态系统服务^[42,67](图2)。因此,可从景观组成异质性与景观构型异质性入手,分析景观空间异质性在生态系统服务形成与供给过程中所起到的作用。

2.1 景观组成异质性的影响

生态系统服务产生于不同的服务提供单元(表3),服务提供单元的随机组合与空间配置变化都会直接影响到相应生态系统服务的产量与质量^[68-71]。Qiu 等^[50]分析了景观空间异质性对3种水文生态系统服务(淡水供给、地下水和地表水的水源质量)的重要性,其中,选取年平均磷负荷作为地表水水源质量服务的代表性指标,并将其与研究区的景观指数进行统计分析。结果显示,地表水水源质量与林地、草地和湿地面积占比呈正相关,与农田面积占比呈负相关。由表3可知,水源质量的服务提供单元主要为湿地和植被覆盖地区,与研究结果相吻合。

这表明增加某生态系统服务所对应的服务提供单元,有助于该生态系统服务的形成。例如,在一定区域内,提高农田、果林和菜地的面积占比可促进并提高农业生产服务的形成。然而,区域内同时存在着多种生态系统服务,且生态系统服务之间有着复杂的权衡与协同关系。在提高农业生产服务形成的同时,湿地、林地、草地等面积占比减小,将会影响侵蚀调控、洪水调控等生态系统服务的形成,不利于多种生态系统服务的维持和可持续发展。因此,提高景观组成异质性的同时增加了服务提供单元的类型,景观组成异质性的变化直接影响了生态系统服务的形成与供给。

表3 部分生态系统服务的服务提供单元

Table 3 Service providing units of partial ecosystem services

生态系统服务 Ecosystem services	服务提供单元 Service providing units	生态系统服务 Ecosystem services	服务提供单元 Service providing units
农业生产 Agricultural production	农田, 果林, 菜地	洪水调控 Flood control	湿地
淡水供给 Fresh water supply	集水区	水源质量 Water quality	湿地, 植被覆盖区
薪材与纤维 Wood and fiber	林地, 灌丛	大气调节 Atmosphere regulation	林地, 草地, 湿地, 水域
侵蚀调控 Erosion control	林地, 灌丛, 草地	传粉 Pollination	林地, 农田, 传粉昆虫

2.2 景观构型异质性的影响

一些生态系统服务能够通过调整景观组成异质性达到可持续生产与供给,而营养保持力、传粉、景观美学^[72]与沉积物截留等生态系统服务的形成受景观构型变化的影响更大。以传粉服务为例,景观组成类型、景观组成类型的空间配置及组合方式等任何一项发生变化,均能改变传粉服务的形成和维持能力^[18]。传粉服务的的服务提供单元除林地和农田外还有传粉昆虫,昆虫活动范围较广的特点使其捕食受到生物种间关系和区域内植物多样性等影响^[49,73]。一般来说,农田比林地更有利于传粉服务的形成与维持^[26]。因为大部分林地受人为干扰较大且植物物种较单一,而农田边缘的半自然生境包括了人工林、树篱和沟渠等景观组成类型,植物物种组成较为复杂^[74],传粉昆虫的多样性和物种丰富度较高,传粉服务的生产能力也相对较强。这也说明适当增加景观构型异质性可有效促进一些生态系统服务的形成与供给。

2.3 景观组成异质性与景观构型异质性的影响强度

有研究认为,景观组成比景观构型对生态系统服务形成与维持的影响大,而景观构型比景观组成对生态系统服务生产能力的影响大^[50]。然而,景观空间异质性对生态系统服务的影响及其强度取决于生态系统类

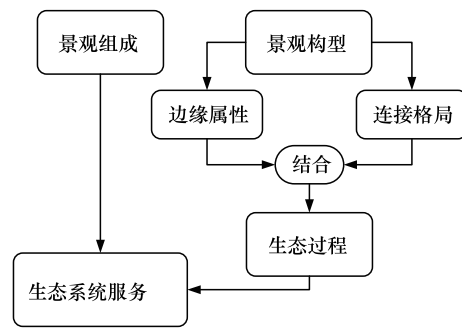


图2 景观组成与景观构型影响生态系统服务的过程

Fig.2 Process of landscape composition and landscape configuration that affect ecosystem services

型、生态系统服务类型与研究的尺度,断不可一概而论。一些生态系统服务对景观组成异质性变化有着显著的响应,却对景观构型异质性变化的敏感度较低;一些生态系统服务则反之;还有一些生态系统服务对二者的变化都较为敏感(表4)。

表4 景观空间异质性变化及生态系统服务的响应

Table 4 Variation of landscape spatial heterogeneity and the response of ecosystem services

生态系统服务 Ecosystem services	较为敏感的景观 空间异质性类型 Sensitive type of landscape spatial heterogeneity	景观空间异质性变化 Variation of landscape spatial heterogeneity	生态系统服务的响应 Response of ecosystem services
薪材与纤维 Wood and fiber	景观组成异质性	林地、灌丛面积占比	薪材与纤维产量变化
淡水供给 Fresh water supply	景观构型异质性	城市边缘区的密集程度	地表径流量、水渗透量变化
空气质量调节 Air quality regulation	景观组成、构型异质性	林地面积占比,景观连接度,乔 灌草的垂直结构和空间配置等	大气污染物质量浓度变化
水源质量 Water quality	景观组成异质性	林地、草地、湿地面积占比	水源质量代表性指标质量浓度 变化
传粉 Pollination	景观构型异质性	边缘植物组成的复杂程度	昆虫个体数、物种丰富度变化
土壤保持 Soil conservation	景观组成、构型异质性	林地、草地面积占比,生态系统 内部结构复杂程度	土壤保持量变化
营养保持 Nutrient conservation	景观构型异质性	生态系统内部结构复杂程度, 乔灌草的空间配置	土壤养分保持量、土壤理化性质 变化
景观美学 Landscape aesthetics	景观构型异质性	乔灌草的空间配置	植物物种丰富度、盖度和密度, α 多样性变化

例如,对水源质量服务来说,适当增加林地、草地和湿地的面积占比,能够有效提高区域内的水源质量,即,调整景观组成类型的丰富度要比改变景观组成类型的空间布局更为有效;同为水文生态系统服务的淡水供给服务则与湿地面积占比呈负相关,而当景观构型发生变化时,如城市边缘区的密集程度增加,可通过降低地表径流量、提高水渗透量来促进淡水供给服务的形成与维持。

通过对部分生态系统服务与景观空间异质性变化关系的总结(表4)也可进一步证实,景观组成异质性变化通常直接影响生态系统服务,而景观构型异质性变化大多会改变一些生态过程,从而间接地影响到生态系统服务(图2)。

3 生态系统服务的空间异质性

景观空间异质性发生变化并影响生态系统服务的同时,也使生态系统服务的形成与供给在空间上产生了异质性分布,即生态系统服务的空间异质性。造成这一系列影响的原因可从自然和人为两个方面解释,其中自然因素是决定生态系统服务空间分布的基础^[75],而人为因素决定了空间上生态系统服务的供给和需求差异。

3.1 自然因素

较大尺度上,宏观的地理背景与地域差异是造成生态系统服务空间异质性的主要因素之一^[1]。生态系统服务形成与供给的热点区域往往与景观中有着较高物种、功能多样性的区域重叠^[76]。自然地理差异较大的景观有着不同的景观组成类型,且生态系统服务热点区域内的物种、功能多样性不尽相同^[34],所提供的生态系统服务类型及其生产能力也不相同。另外,气候变化、林火、泥石流、地震等自然干扰后景观空间异质性会发生变化,使生态系统服务热点区域转移。这些均导致了生态系统服务在空间上的异质性分布。

流域尺度上,生态系统服务的异质性分布也十分明显。流域内地形分异是影响生态系统服务空间异质性的主要原因^[76-77]。以土壤保持服务为例,不同生态系统的土壤保持能力随植被盖度的增加呈线性增长,表现

为森林生态系统最高、草地和农田其次、荒漠生态系统最差的趋势^[59]。流域内高程梯度递减,植被盖度逐渐减少,土壤保持服务也随之下降^[77]。

3.2 人为因素

生态系统服务具有较强的人类中心主义色彩。在社会经济、文化等多重影响下,人类所需的主要生态系统服务也不相同,加上人类对生态系统服务的利用方式与利用强度存在差异,也使生态系统服务具有显著的空间异质性与区域差异性。全球范围来看,发展中国家因其人口增长、经济发展迅速等特点,往往对资源有着较高的需求,因此,对供给服务的索取和利用强度要明显高于调节服务、支持服务和文化服务^[75];而一些发达国家则对文化服务的需求越来越大。此外,由于文化背景、思想意识和教育水平等个体差异,人类对同一生态系统服务的感知和利用也大不相同^[78],然而,目前该方面研究尚不完善。

4 景观空间异质性与生态系统服务研究中的尺度问题

单独探讨景观空间异质性与生态系统服务研究中的尺度问题,是因为尺度是造成景观空间异质性变化的主导因素,不与尺度相结合的景观空间异质性研究是没有任何意义的^[79-80]。而生态系统服务作为自然生态过程与人文过程相互作用的产物,其特征亦随尺度的变化而变化。因此,在人类改变景观空间异质性并影响生态系统服务的形成与维持过程中的任一环节均需考虑尺度问题。

作为生态系统服务提供的主体,人类从不同尺度生态系统中获取的生态系统服务类型亦不相同,加上不同尺度上的人类活动引起的生态效应不同,使供给服务一般形成于局部尺度,而调节服务多形成于区域或更大尺度。此外,服务提供单元所处的时空尺度并不是一定的^[68],且不同物种和生态系统服务类型对景观空间异质性的响应尺度也不一致^[81-82]。如,传粉服务的服务提供单元是位于较小尺度上的林地、农田和传粉昆虫,所以该生态系统服务的空间范围较小(局部),持续时间较短(多具有季节性等周期性),流动距离也较短;而大气调节服务的服务提供单元是较大尺度上的林地、草地、湿地和水域,所以该生态系统服务的空间范围较大(从局部到全球),持续时间及流动距离也较长^[1,68]。

由一种尺度上得出的研究结论不能盲目推广到另一种尺度上,因此,在景观或更大尺度上研究生态系统服务时,更应将尺度问题纳入到研究内。在探究景观空间异质性如何影响生态系统服务的形成与供给时,应首先明确所研究生态系统服务的尺度范围,考量影响该生态系统服务的景观空间异质性变化具有何种尺度特征,以及不同尺度的景观空间异质性变化对生态系统服务影响存在的差异。

5 展望

综上,景观空间异质性可直接影响生态系统服务的形成、供给与时空分布,也可通过改变生态过程而间接作用于生态系统服务。结合景观空间异质性来研究生态系统服务,有助于理解多重生态系统服务的空间分布格局及其对景观空间异质性变化的响应,为生态系统服务的生产能力、维持和供给提供可行的空间优化,并对有较高生物多样性价值的地区及多重生态系统服务传递的重点区域进行有效保护。在今后的研究中,应围绕以下问题进行深入探讨:1)人为因素。人类是生态系统服务的主要受益者,同时,人类活动及与人类密切相关的社会、经济、政策因素是造成景观空间异质性变化的主要原因。大多数研究将讨论景观格局变化作为分析生态系统服务变化的主体,对人为因素的分析不够充分。如何将人为因素与地理、生态因素完美结合,是今后研究中需要着重考虑的问题。2)尺度问题。尺度是始终贯穿地理学和生态学研究的重要论题,在不同尺度下生态系统服务的形成、供给与需求将呈现不同的机制与表征。如何将小尺度上的生态系统服务在景观及更大尺度上集成体现,是未来研究中的重点与难点。3)实践与应用。在理论依据不断成熟与完善的基础上,应考虑在现实中如何通过调整景观组成和景观构型来提高生态系统服务的产量与质量,将景观格局规划与生态系统服务管理相结合,使生态系统可持续地为人类提供服务,实现双赢。

参考文献 (References):

- [1] 李双成. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社, 2014: 26-139.
- [2] Inouye D W. The next century of ecology. *Science*, 2015, 349(6248): 565-565.
- [3] 中国科学院科技战略咨询研究院, 中国科学院文献情报中心, Clarivate Analytics. 2016 研究前沿. (2017-06-30) [2018-06-06]. <http://www.casisd.cn/zkcg/zxcg/201706/P020170630547596614787.pdf>.
- [4] 杨兆平, 高吉喜, 沈渭寿, 刘波, 邹长新. 基于文献分析的中国生态服务研究. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(6): 1-7.
- [5] 马凤娇, 刘金铜, Eneji A E. 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述. *生态学报*, 2013, 33(19): 5963-5972.
- [6] 刘绿怡, 刘慧敏, 任嘉衍, 卞子元, 丁圣彦. 生态系统服务形成机制研究进展. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2731-2738.
- [7] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, 17(5): 453-461.
- [8] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用(第二版). 北京: 科学出版社, 2011: 29-115.
- [9] 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.
- [10] Hillebrand H, Matthiessen B. Biodiversity in a complex world: consolidation and progress in functional biodiversity research. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1405-1419.
- [11] Fischer A, Eastwood A. Coproduction of ecosystem services as human-nature interactions—an analytical framework. *Land Use Policy*, 2016, 52: 41-50.
- [12] 范昊, 赵文武, 丁婧祎. 连接景观异质性与社会环境系统——2017年美国景观生态学年会(The US-IALE 2017 Annual Meeting)会议述评. *生态学报*, 2017, 37(14): 4919-4922.
- [13] Isbell F, Gonzalez A, Loreau M, Cowles J, Diaz S, Hector A, Mace G M, Wardle D A, O'Connor M I, Duffy J E, Turnbull L A, Thompson P L, Larigauderie A. Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales. *Nature*, 2017, 546(7656): 65-72.
- [14] Winfree R, Reilly J R, Bartomeus I, Cariveau D P, Williams N M, Gibbs J. Species turnover promotes the importance of bee diversity for crop pollination at regional scales. *Science*, 2018, 359(6377): 791-793.
- [15] Tschamntke T, Batáry P, Dormann C F. Set-aside management: how do succession, sowing patterns and landscape context affect biodiversity? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 143(1): 37-44.
- [16] Prager K, Reed M, Scott A. Encouraging collaboration for the provision of ecosystem services at a landscape scale—Rethinking agri-environmental payments. *Land Use Policy*, 2012, 29(1): 244-249.
- [17] 邬建国, 郭晓川, 杨劼, 钱贵霞, 牛建明, 梁存柱, 张庆, 李昂. 什么是可持续性科学? *应用生态学报*, 2014, 25(1): 1-11.
- [18] Verhagen W, Van Teeffelen A J A, Compagnucci A B, Poggio L, Gimona A, Verburg P H. Effects of landscape configuration on mapping ecosystem service capacity: a review of evidence and a case study in Scotland. *Landscape Ecology*, 2016, 31(7): 1457-1479.
- [19] 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. *自然杂志*, 2012, 34(5): 277-283.
- [20] Wiens J A, Moss M. *Issues and Perspectives in Landscape Ecology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005: 25-28.
- [21] 宋博, 丁圣彦, 赵爽, 李子哈, 侯笑云. 农业景观异质性对生物多样性及其生态系统服务的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(4): 443-450.
- [22] Fahrig L, Baudry J, Brotons L, Burel F G, Crist T O, Fuller R J, Sirami C, Siriwardena G M, Martin J L. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology Letters*, 2011, 14(2): 101-112.
- [23] Turner M G. Landscape ecology in North America: past, present, and future. *Ecology*, 2005, 86(8): 1967-1974.
- [24] Lovett G M, Jones C G, Turner M G, Weathers K C. *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*. New York: Springer, 2005: 451-462.
- [25] 秦向红. 景观异质性与生物多样性关系探讨. 哈尔滨师范大学: 自然科学学报, 1997, 13(4): 98-102.
- [26] 王润, 丁圣彦, 卢训令, 宋博. 黄河中下游农业景观异质性对传粉昆虫多样性的多尺度效应——以巩义市为例. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2145-2153.
- [27] Newton T J, Woolnough D A, Strayer D L. Using landscape ecology to understand and manage freshwater mussel populations. *Journal of the North American Benthological Society*, 2008, 27(2): 424-439.
- [28] Prugh L R, Hodges K E, Sinclair A R E, Brashares J S. Effect of habitat area and isolation on fragmented animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(52): 20770-20775.
- [29] 侯笑云, 宋博, 赵爽, 丁圣彦. 黄河下游封丘县不同尺度农业景观异质性对鞘翅目昆虫多样性的影响. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(1): 77-81.
- [30] Dormann C F, Schweiger O, Augenstein I, Bailey D, Billeter R, De Blust G, DeFilippi R, Frenzel M, Hendrickx F, Herzog F, Klotz S, Liira J, Maelfait J P, Schmidt T, Speelmans M, Van Wingerden W K R E, Zobel M. Effects of landscape structure and land-use intensity on similarity of

- plant and animal communities. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(6): 774-787.
- [31] Strayer D L, Beighley R E, Thompson L C, Brooks S, Nilsson C, Pinay G, Naiman R J. Effects of land cover on stream ecosystems: roles of empirical models and scaling issues. *Ecosystems*, 2003, 6(5): 407-423.
- [32] Bennett E M, Carpenter S R, Clayton M K. Soil phosphorus variability: scale-dependence in an urbanizing agricultural landscape. *Landscape Ecology*, 2005, 20(4): 389-400.
- [33] Burkhard B, Kroll F, Müller F, Windhorst W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services—a concept for land-cover based assessment. *Landscape Online*, 2009, 15: 1-22.
- [34] Turner M G, Donato D C, Romme W H. Consequences of spatial heterogeneity for ecosystem services in changing forest landscapes: priorities for future research. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 1081-1097.
- [35] 郭中伟, 甘雅玲. 关于生态系统服务功能的几个科学问题. *生物多样性*, 2003, 11(1): 63-69.
- [36] Musacchio L R. The scientific basis for the design of landscape sustainability: a conceptual framework for translational landscape research and practice of designed landscapes and the six Es of landscape sustainability. *Landscape Ecology*, 2009, 24(8): 993-1013.
- [37] Grêt-Regamey A, Rabe S E, Crespo R, Lautenbach S, Ryffel A, Schlup B. On the importance of non-linear relationships between landscape patterns and the sustainable provision of ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2014, 29(2): 201-212.
- [38] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 城市化对流域生态系统服务价值空间异质性的影响——以南京市九乡河流域为例. *自然资源学报*, 2011, 26(10): 1715-1725.
- [39] 李博, 石培基, 金淑婷, 魏伟, 周俊菊. 石羊河流域生态系统服务价值的空间异质性及其计量. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 943-951.
- [40] 谢红霞, 任志远, 李锐. 区域生态服务价值时空异质性研究——以铜川市城郊区为例. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 121-127.
- [41] 刘琳, 刘雪华. 黄土高原 1990-2000 年间的景观格局演变及生态系统服务功能分析. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(5): 8-13.
- [42] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, Liu Y, Qiao J M, Wang X, Du J S. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 718-728.
- [43] Mitchell M G E, Bennett E M, Gonzalez A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: current knowledge and research gaps. *Ecosystems*, 2013, 16(5): 894-908.
- [44] Mitchell M G E, Suarez-Castro A F, Martinez-Harms M, Maron M, McAlpine C, Gaston K J, Johansen K, Rhodes J R. Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(4): 190-198.
- [45] 王航, 秦奋, 朱筠, 张传才. 土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2017, 37(4): 1286-1296.
- [46] Eziz M, Yimit H, Tursun Z, Rusuli Y. Variations in ecosystem service value in response to oasis land-use change in Keriya Oasis, Tarim Basin, China. *Natural Areas Journal*, 2014, 34(3): 353-364.
- [47] Kindu M, Schneider T, Teketay D, Knoke T. Changes of ecosystem service values in response to land use/land cover dynamics in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 137-147.
- [48] Camacho-Valdez V, Ruiz-Luna A, Ghermandi A, Berlanga-Robles C A, Nunes P A L D. Effects of land use changes on the ecosystem service values of coastal wetlands. *Environmental Management*, 2014, 54(4): 852-864.
- [49] Kremen C, Williams N M, Aizen M A, Gemmill-Herren B, LeBuhn G, Minckley R, Packer L, Potts S G, Roulston T, Steffan-Dewenter I, Vázquez D P, Winfree R, Adams L, Crone E E, Greenleaf S S, Keitt T H, Klein A, Regetz J, Ricketts T H. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology Letters*, 2007, 10(4): 299-314.
- [50] Qiu J X, Turner M G. Importance of landscape heterogeneity in sustaining hydrologic ecosystem services in an agricultural watershed. *Ecosphere*, 2015, 6(11): 1-19.
- [51] Harrison I J, Green P A, Farrell T A, Juffe-Bignoli D, Sténoz L, Vörösmarty C J. Protected areas and freshwater provisioning: a global assessment of freshwater provision, threats and management strategies to support human water security. *Aquatic Conservation*, 2016, 26(S1): 103-120.
- [52] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 吴婧, 胡宝清. 基于 InVEST 模型的白龙江流域水源供给服务时空分异. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1337-1347.
- [53] 王小平, 张飞, 李晓航, 曹灿, 郭苗, 陈丽华. 艾比湖区域景观格局空间特征与地表水质的关联分析. *生态学报*, 2017, 37(22): 7438-7452.
- [54] 廖文婷, 邓红兵, 李若男, 郑华. 长江流域生态系统水文调节服务空间特征及影响因素: 基于子流域尺度分析. *生态学报*, 2018, 38(2): 412-420.
- [55] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [56] 丁宇, 李贵才, 路旭, 高梅. 空间异质性及绿色空间对大气污染的削减效应——以大珠江三角洲为例. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1415-1421.
- [57] Escobedo F J, Nowak D J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 90(3/4):

102-110.

- [58] Biesmeijer J C, Roberts S P M, Reemer M, Ohlemüller R, Edwards M, Peeters T, Schaffers A P, Potts S G, Kleukers R, Thomas C D, Settele J, Kunin W E. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science*, 2006, 313(5785): 351-354.
- [59] 陈龙, 谢高地, 裴履, 张昌顺, 范娜, 张彩霞, 李士美. 澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2249-2256.
- [60] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 李宗善, 杨荣金. 黑河中上游地区 2000-2010 年土地利用变化及水土保持服务功能. *生态学报*, 2014, 34(23): 7013-7025.
- [61] Grêt-Regamey A, Bebi P, Bishop I D, Schmid W A. Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region. *Journal of Environmental Management*, 2008, 89(3): 197-208.
- [62] Eigenbrod F, Armsworth P R, Anderson B J, Heinemeyer A, Gillings S, Roy D B, Thomas C D, Gaston K J. The impact of proxy-based methods on mapping the distribution of ecosystem services. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(2): 377-385.
- [63] Kepner W G, Ramsey M M, Brown E S, Jarchow M E, Dickinson K J M, Mark A F. Hydrologic futures: using scenario analysis to evaluate impacts of forecasted land use change on hydrologic services. *Ecosphere*, 2012, 3(7): 1-25.
- [64] Beckert K A, Fisher T R, O'Neil J M, Jesien R V. Characterization and comparison of stream nutrients, land use, and loading patterns in Maryland coastal bay watersheds. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 221(1/4): 255-273.
- [65] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [66] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦, 梁国付, 卢训令. 陆地生态系统服务与生物多样性研究进展. *生态学报*, 2016, 36(15): 4583-4593.
- [67] Fagerholm N, Käyhkö N, Ndumbo F, Khamis M. Community stakeholders' knowledge in landscape assessments-Mapping indicators for landscape services. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 421-433.
- [68] Andersson E, McPhearson T, Kremer P, Gomez-Baggethun E, Haase D, Tuvendal M, Wurster D. Scale and context dependence of ecosystem service providing units. *Ecosystem Services*, 2015, 12: 157-164.
- [69] Blumstein M, Thompson J R. Land-use impacts on the quantity and configuration of ecosystem service provisioning in Massachusetts, USA. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(4): 1009-1019.
- [70] Guo H, Wang B, Ma X Q, Zhao G D, Li S N. Evaluation of ecosystem services of Chinese pine forests in China. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2008, 51(7): 662-670.
- [71] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营. *生态学报*, 2018, 38(1): 1-10.
- [72] 唐高溶. 旅游干扰下喀纳斯草地景观美学价值变化及其影响因素分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [73] Roberts S P M, Potts S G. The status of European non-*Apis* bees. *Journal of Apicultural Research*, 2010, 49(1): 137-138.
- [74] Fahrig L, Girard J, Duro D, Pasher J, Smith A, Javorek S, King D, Lindsay K F, Mitchell S, Tischendorf L. Farmlands with smaller crop fields have higher within-field biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200: 219-234.
- [75] 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.
- [76] Lavorel S, Grigulis K, Lamarque P, Colace M P, Garden D, Girel J, Pellet G, Douzet R. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology*, 2011, 99(1): 135-147.
- [77] 郜红娟, 韩会庆, 俞洪燕, 韩默然. 乌江流域重要生态系统服务地形梯度分布特征分析. *生态科学*, 2016, 35(5): 154-159.
- [78] Zoderer B M, Stanghellini P S L, Tasser E, Walde J, Wieser H, Tappeiner U. Exploring socio-cultural values of ecosystem service categories in the Central Alps; the influence of socio-demographic factors and landscape type. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(7): 2033-2044.
- [79] 王书明, 张志华. 景观格局—生态过程—生态系统服务的系统耦合——傅伯杰景观生态学思想述评. *鄱阳湖学刊*, 2017, (2): 78-83.
- [80] Chave J. The problem of pattern and scale in ecology: what have we learned in 20 years? *Ecology Letters*, 2013, 16(S1): 4-16.
- [81] Gabriel D, Sait S M, Hodgson J A, Schmutz U, Kunin W E, Benton T G. Scale matters: the impact of organic farming on biodiversity at different spatial scales. *Ecology Letters*, 2010, 13(7): 858-869.
- [82] García D, Zamora R, Amico G C. The spatial scale of plant-animal interactions: effects of resource availability and habitat structure. *Ecological Monographs*, 2011, 81(1): 103-121.