

# 过程耦合与空间集成:国土空间生态修复的景观生态学认知

彭建<sup>1,2</sup>, 吕丹娜<sup>2</sup>, 董建权<sup>1</sup>, 刘焱序<sup>3</sup>, 刘前媛<sup>2</sup>, 李冰<sup>1</sup>

(1. 北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; 3. 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)

**摘要:** 新时期国土空间生态修复的核心是整体保护与系统治理, 强调生态保护修复与社会经济发展耦合关联的系统性、协同性。景观生态学以景观为研究对象, 基于整体综合视角聚焦景观结构与功能演变及其与人类社会相互作用机理, 重点关注过程耦合与空间集成。面向国土空间生态修复的战略需求, 景观生态学“格局与过程耦合—时空尺度—生态系统服务—景观可持续性”的研究路径能够为国土空间生态修复提供重要学科支撑; 依据格局—过程互馈机理识别退化、受损的山水林田湖草生命共同体, 基于景观多功能性权衡协调社会—生态需求并确定修复目标, 应用生态安全格局优化多层次修复网络体系, 建立面向景观可持续性的多尺度级联福祉保障。

**关键词:** 国土空间生态修复; 景观生态学; 过程耦合; 空间集成

国土空间是承载人类活动的物质载体, 由生态系统与人类社会相互作用形成。“人类世”的到来, 昭示人类活动已经成为改变和重塑国土空间的主要驱动力<sup>[1]</sup>。随着社会生产力的发展, 人类活动对地球表层系统的影响范围越来越广, 强度越来越深。空间上表现为生产、生活空间不同程度地挤占具有重要生态系统服务供给能力的生态空间<sup>[2]</sup>, 时间上则呈景观格局破碎化和地表覆被硬化趋势<sup>[3]</sup>。自然资源的无序开发加剧了区域发展质量的不平衡、发展与保护的不协调, 生态环境问题越发凸显, 胁迫人类可持续发展。

如何协同社会经济发展与生态环境保护已经是全球可持续发展研究的核心议题。2019年, 联合国宣布2021-2030年为生态系统恢复十年, 目的是扩大预防、遏止和扭转全世界退化生态系统工作的规模, 提高对成功恢复生态系统重要性的认识<sup>[4]</sup>。国内自20世纪90年代以来, 针对森林、草地和湿地生态系统持续开展了一系列大型生态恢复工程<sup>[5]</sup>, 形成了工矿、水域、生物和环境等典型生态修复技术<sup>[6-8]</sup>。但目前以恢复生态学、环境生态学为理论指导的生态修复多为特定点位或局地面积修复工程, 忽略了生态系统的过程耦合及大尺度的空间集成, 致使生态系统健康虽然在局部空间得到明显改善, 但总体效果差强人意, 生态环境治理进入瓶颈期<sup>[9,10]</sup>。生态修复是长期性生态工程, 其治理效果是人类活动与自然本底的综合表征, 因此迫切需要引入新的理论、方法论, 整合先进的、具有示范性的实践经验, 基于多尺度人类活动与自然环境互馈共生的系统

收稿日期: 2019-10-13; 修订日期: 2019-12-17

基金项目: 研究阐释党的十九大精神国家社科基金专项课题 (18VSI041)

作者简介: 彭建 (1976-), 男, 四川彭州人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为景观生态与土地利用、区域生态持续性评估、综合自然地理学。E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

认知和实施路径,切实提升生态修复的协同性、系统性。

作为博采地理学、生态学、系统科学等学科众长交叉形成的综合学科,景观生态学以景观为研究对象,关注不同尺度下景观格局与社会—生态过程的相互作用。随着人类活动对景观变化的驱动作用不断增强,景观生态学更加关注人类活动对景观格局和过程的影响,并基于社会—生态过程整合评价、识别、调控、模拟等手段,探索异质性区域景观功能及综合服务的优化途径,通过空间集成提高人类福祉、促进区域可持续发展,为国土空间生态修复提供区域整体性与尺度关联视角。景观生态学在自然资源规划、利用和保护等方面已有广泛应用,如绿色基础设施网络构建与优化<sup>[11,12]</sup>、基本农田布局<sup>[13]</sup>、生态安全格局识别与优化<sup>[14,15]</sup>,但在国土空间生态修复方面的理论探讨与实践应用相对较少。基于此,本文立足景观生态学“格局与过程耦合—时空尺度—生态系统服务—景观可持续性”的研究路径,明晰国土空间生态修复的内涵转变与战略需求,探索景观生态学理论与方法在国土空间生态修复的应用指向,以期构建生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀的国土空间开发保护格局与可持续发展提供系统性的决策支撑。

## 1 国土空间生态修复与景观生态学

### 1.1 国土空间生态修复的战略需求

生态修复脱胎于自然资源管理,早期关注自然资源为人类提供服务和产品能力的管理<sup>[16]</sup>。生产力进步大大提高了人类对自然资源的需求,但过度利用导致自然资源无法承载,进而致使矿山、森林等发生退化。2005年联合国发布的《千年生态系统评估报告》表明,近50年来人类近乎疯狂地攫取自然资源,生态系统服务中有60%在退化和被人类以不可持续的方式利用<sup>[17]</sup>。生态系统退化和优质生态产品短缺直接威胁区域乃至全球的生态安全,难以支撑社会经济的可持续发展。为了修复退化的自然资源,生态修复应运而生。有关生态修复概念、原理、技术与方法的研究逐渐受到关注,尽管生态修复的内涵界定一直处于发展变化中。目前,受到广泛认可的生态修复定义由国际生态修复学会提出,将生态修复定义为协助已遭受退化、损伤或破坏的生态系统恢复的过程<sup>[16]</sup>。

国际上,生态修复已逐渐得到从公众到政府的普遍关注,《生物多样性公约》明确提出在就地保护时要重建和恢复已退化的生态系统。经过长达50多年的生态修复,莱茵河已由最初的“欧洲下水道”成为3000多万人的饮用水源地<sup>[18]</sup>,1999年缔结的《莱茵河保护公约》进一步明确了“自然方式”治理的主导性。德国通过重新设计低地河流河道成功降低了洪水发生风险并增加了无脊椎动物的多样性<sup>[19]</sup>,澳大利亚在铝土矿废弃地成功恢复了红柳桉树生态系统<sup>[20]</sup>。2019年3月,联合国发布2021-2030生态系统恢复十年计划,号召扩大生态系统修复范围,全球、国家及地方共同努力,采用近自然方式优先保护生物多样性及自然生境、遏止退化趋势,积极应对生物多样性锐减、荒漠化加剧、土地退化等问题。

自20世纪50年代以来,中国生态修复开始起步并取得一定成效<sup>[5,6]</sup>。生态修复的对象和范围通常关注小尺度单一类型生态系统如森林、湖泊,或单一自然地理要素如水体、大气、土壤及生物等污染或者退化过程,进行点状治理。末端治理是20世纪生态修复的显著特征,通过对明显受损、退化的生态系统实施结构调控从而使其过程或功能达到或

超过生态系统初始状态。然而，由于实践中常机械地对森林、耕地、草地、水体等要素制定单一目标，由对应管理部门分治，导致生态修复的局部效果显著但整体效果不突出。同时，生态修复大多由区域自主施行，忽视了社会经济建设对生态系统需求的影响，致使部分生态工程短期颇有成效、长期却修而复退。随着区域性生态系统要素冲突等问题显现，传统生态修复忽略生态要素关联的缺陷逐渐暴露，多尺度整合与生态过程完整性的实践缺失使得生态修复工作陷入困境，亟需引入新的理论和方法提高大尺度生态修复的系统性、协同性。

随着我国社会主要矛盾转为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾，社会经济系统由注重高速度增长转向高质量发展。高品质国土空间是助力社会经济高质量发展的物质基础<sup>[21]</sup>。由于国土资源的稀缺性和不可再生性，可供开发的国土空间及其承载的自然资源日渐逼近上限，且空间上存在严重的不平衡。如何对国土空间实施合理开发、保护和修复，变革国土空间利用方式促进其可持续发展成为当务之急。为了支撑社会经济转型，党的十八大首次把生态文明建设上升到中国特色社会主义建设“五位一体”总体布局的战略高度，围绕建设美丽中国布局资源节约、生态修复和环境保护三大任务。党的十九大报告进一步明确建设生态文明、建设美丽中国的总体要求——加大生态系统保护力度、统筹山水林田湖草系统治理、实施重要生态系统保护和修复重大工程。同时在术语使用上，生态修复逐渐转换为国土空间生态修复。2019年5月，《中共中央国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》中明确提出国土空间生态修复的实施要求：“坚持山水林田湖草生命共同体理念，加强生态环境分区管治，量水而行，保护生态屏障，构建生态廊道和生态网络，推进生态系统保护和修复”。由此，将山水林田湖草视为生命共同体，系统实施国土空间生态修复成为新时期国家生态文明建设的重大战略需求<sup>[9]</sup>。

国土空间生态修复是对生态修复的继承与发展，融入生态系统服务视角，综合运用各项整治修复措施，以山水林田湖草系统治理、矿山生态修复、土地综合整治和蓝色海湾综合整治为抓手，致力于优化国土空间开发格局、提高自然资源利用效率、改善生态环境质量，以期协同实现生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀的最终目标。从生态修复到国土空间生态修复，其核心认知在思路、手段、目标、实施等方面均发生了根本性改变，更加强调国土空间的系统认知和整体统筹。新时期国土空间生态修复在思路上强调以“山水林田湖草是一个生命共同体”为认知基础，从单一的要素修复转向山、水、林、田、湖、草等全要素的全域、全过程协同治理。手段上，国土空间生态修复从末端修复、结构调控走向源头治理、过程耦合、空间集成。同时，秉承“绿水青山就是金山银山”的发展理念，国土空间生态修复的目标从单一目标线性治理，走向社会、经济、生态的多目标综合协同。国土空间生态修复实施时需权衡自然资源本底约束和社会经济需求，力求空间公平，使人口、经济、资源环境协同发展，并维持相对稳定。此外，在实施上，国土空间生态修复从区域自主治理走向国家顶层设计。国土空间生态修复高度强调生态过程的完整性，这就要求打破行政边界对生态过程的割裂，从国家层面进行战略统筹，区域协同施策，提升国家空间治理的网络化、系统化水平。

## 1.2 景观生态学的学科特质

景观生态学是研究景观组成单元的类型构成、空间格局及其与生态学过程相互作用的综合性学科<sup>[22]</sup>，重点关注过程耦合与空间集成。其中，过程耦合体现为景观过程之间



的相互影响和作用,包括自然过程与人文过程的耦合、地理过程的时空耦合等。由于景观格局与社会—生态过程相互影响,过程耦合往往也包括景观格局与社会—生态过程的耦合。正确认识过程耦合机理是识别、预测系统动态演化的关键<sup>[22]</sup>。空间集成是在过程耦合机理识别基础上,以空间单元为载体,整合景观结构、过程和功能,基于景观格局优化达成景观功能与过程的高效、协调、有序。空间集成强调多要素关联及其综合作用分析,关注要素分析的系统性、整体性、动态性和协调性,包括不同尺度系统要素的多层次整合,特定尺度社会、经济和自然系统的要素整合等。过程耦合是景观生态学对景观要素关联的认知基础,空间集成为景观综合的实践手段,“格局与过程耦合—时空尺度—生态系统服务—景观可持续性”则构筑了景观生态学从理论认知到实践应用的级联路径。

格局即景观的空间结构,包括景观组成单元的类型、大小、形状、数目及其空间分布与配置,其根本属性为空间异质性。空间异质性决定了景观斑块及整体格局的多样性和复杂性。受自然环境、人类活动等因素影响,不同类型的斑块在空间上呈随机、均匀或聚集分布。过程则强调事件或现象发生、发展的动态特征,可分为生态学过程如种群动态、群落演替,社会过程如人口迁徙、交通运输和土地利用转型等。尺度是景观格局与过程的固有属性,指时间、空间范围及其分辨率;随着时空尺度的变化,景观现象和过程会产生变异性,即尺度效应。景观格局是各种过程在不同时空尺度上相互作用的结果,反过来又决定自然生态因子在景观中的空间分布和组合,从而制约生态过程。厘清景观格局与过程的互馈机理是景观生态学核心议题与应用基础,明晰适宜尺度则是有效观测、评估及优化格局与过程耦合关系的前提。

随着人类活动范围扩大、强度增加,景观生态学研究视角趋于从生态过程转向社会—生态过程,集中关注自然—经济—社会系统的关联。生态系统服务的提出成功桥接了自然与人文过程,为客观量化评估自然资源对人类福祉的贡献提供了综合视角,使景观生态学逐渐从理论认知走向决策实践<sup>[23]</sup>。以生态系统服务为媒介,生态系统服务变化对人类福祉的影响、生态系统服务供需的政策响应等相关研究成果已成为生态保护、生态区划、自然资源资产核算和生态补偿等生态系统管理的重要依据和决策基础<sup>[24-28]</sup>。目前,景观生态学从全球、区域和局地三个核心尺度关注景观格局、生态系统服务和人类福祉三者的动态关系,寻求协调社会经济发展与自然生态保护的合理途径,以期提升景观可持续性、实现人类福祉的长期维持。

### 1.3 国土空间生态修复与景观生态学的理论契合

以过程耦合、空间集成为理论内核,景观生态学与新时期国土空间生态修复战略需求高度契合(图1)。新时期的国土空间生态修复强调国土空间自然资源属性和空间属性的统一,核心是系统治理,这与景观生态学的整体性原则相一致。景观生态学的“格局—过程—尺度”级联能够为国土空间生态修复提供机理认知,而“格局与过程耦合—时空尺度—生态系统服务—景观可持续性”研究路径则为国土空间生态修复提供了一体化的实践手段。具体而言,格局与过程耦合可以帮助国土空间生态修复厘清山水林田湖草各要素间的复杂关联关系,为实施全域、全要素、全过程生态修复提供理论基础。以国土空间为载体,基于多尺度的结构调控和功能优化使国土空间生态修复化被动为主动,从源头入手,在国家、省、市、县和乡镇尺度自上而下和自下而上联动修复退化、受损的生命共同体。生态系统服务为国土空间生态修复从时空尺度整合社会、经济、生态需求提供了认知视角和决策途径,景观可持续性则为国土空间生态修复构建起立足现在、

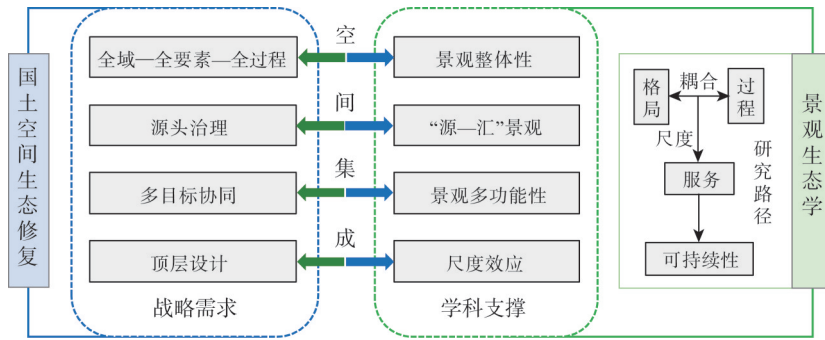


图1 国土空间生态修复与景观生态学的逻辑关联

Fig. 1 Correlation between ecological restoration of territorial space and landscape ecology

展望未来，聚焦问题、面向目标的福祉保障。

具体至景观生态学基本理论及认知，国土空间生态修复根据景观整体性原则需要强调全域、全要素、全过程的系统治理，研究对象从自然生态系统扩展到社会—生态系统，由针对矿山、河流、湿地等单要素局部修复转向基于社会—生态过程的山、水、林、田、湖、草多要素系统修复。“源—汇”景观理论为从末端被动治理走向源头主动治理提供了关键要素识别、重点结构调控的认知基础和操作途径。景观具有同时提供多种功能以满足人类社会、经济、生态需求的特性，即景观多功能性，为国土空间生态修复整合社会、经济、生态多维度，保护、整治、修复多目标提供了综合协同视角。进一步地，尺度效应为国土空间生态修复从局地走向全域，在乡镇、市县、省、全国多等级协同保护和修复重要生态节点、关键生态廊道提供了理论支撑。格局与过程的相互作用随着尺度的推移发生改变，在不同尺度上国土空间生态修复实践的关注点也存在差异。例如，国家层面强调国土空间生态修复的战略性和省级层面强调协调性、市县和乡镇层面强调实施性，同时需要关注跨越层级时国土空间生态修复的传导性。

## 2 国土空间生态修复的景观生态学认知

国土空间生态修复的对象本质上是景观，新时期的国土空间生态修复需权衡人类需求和自然资源保护，解决生态空间不足、生态格局破碎化、生态产品稀缺等问题，为区域发展提供可持续的物质保障。国土空间生态修复需要依据格局—过程互馈机理识别退化、受损的山水林田湖草生命共同体，基于景观多功能性权衡视角协调社会—生态需求并确定修复目标，应用生态安全格局优化多层级修复网络体系，建立面向景观可持续性的多尺度级联福祉保障（图2）。

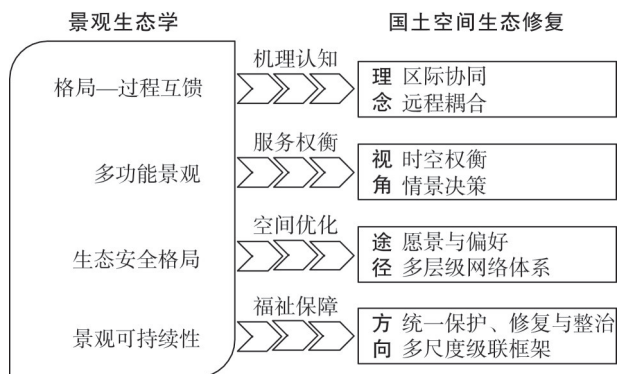


图2 国土空间生态修复的景观生态学认知

Fig. 2 Thematic characteristics in ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology

## 2.1 格局—过程互馈—机理认知

国土空间生态修复工程直接作用于景观结构和空间格局,分析景观格局与过程互馈关系是识别修复对象、实施系统修复的基础和前提。景观要素之间具有明显的异质性特征,但又相互联系、相互影响,共同保障生态功能的完整性。生态过程演变中景观要素可能起正向推动作用或负向滞缓作用,形成“源”“汇”景观<sup>[29]</sup>。“源”“汇”景观是格局—过程互馈理论在国土空间生态修复中的重要应用。从格局与过程互馈出发,在明确生态过程的基础上,“源—汇”景观理论能够应用于缓解非点源污染<sup>[29]</sup>、土壤侵蚀<sup>[30]</sup>和城市热岛效应<sup>[31]</sup>,识别亟需修复的斑块,为国土空间生态修复提供调控生态过程的途径。

正如城镇化与生态环境交互耦合效应分析中,对缓解交互胁迫的关键主控要素的高度关注<sup>[32]</sup>,国土空间生态修复实践亦需要准确识别命运共同体中亟需修复的关键要素,才能进而恢复、优化生态系统的结构与功能;而基于格局与过程的互馈机理,判明景观要素间的关联关系,则是关键要素识别的重要基础。同时,由于地球表层系统的复杂性和层级性,由特定生态过程串联的“源”“汇”景观与行政区域通常存在空间不匹配,如侵蚀产沙通常发生在流域尺度,具有跨行政区的特点<sup>[30]</sup>。因此,国土空间生态修复还需关注格局—过程互馈的域外效应。

根据要素相互作用的空间距离远近,生态过程之间既有近程耦合,又有远程耦合。近程耦合由于关联要素相互作用的空间距离较短,容易识别其作用过程进而实施国土空间生态修复。远程耦合如陆海交互,由于作用过程尺度较大,国土空间生态修复实践容易限定在实体空间,只关注一定地理空间范围内生态系统结构的整体性会忽视其功能完整性。因此,运用景观生态学格局与过程互馈理论,梳理、整合区域内部及区域之间的生态过程对维持特定区域或区际整体的生态完整性(尤其是功能完整性)具有重要意义。

## 2.2 多功能景观——服务权衡

多功能景观意味着基于人类福祉需求视角,景观能够提供满足人类生存与发展所需要的多类型、多层次产品和服务。基于多功能景观视角,国土空间生态修复需要梳理区域生态本底,权衡相关利益群体需求。这是由于生态系统服务间常常相互影响、相互约束,存在权衡与协同关系,即某种生态系统服务的增加可能导致其他生态系统服务的增加或减少。例如,退耕还林生态工程中土壤保持、净初级生产力和产水三种服务之间存在权衡关系<sup>[33]</sup>。国土空间生态修复实施时厘清景观多功能之间的权衡与协同规律,有利于规避负向效应,促进各种服务协调发展,最大化发挥景观价值,实现生态保护修复和社会经济发展的共赢。

在具体实践中,多功能景观识别往往从生态系统服务的视角,兼顾景观的生态功能以及社会、经济、文化、历史和美学功能,综合评价区域生态系统服务的供给现状,从时空尺度权衡利益相关者的多方需求,帮助确定国土空间生态修复目标和最优策略。由于景观空间异质性的存在,加之不同主体功能区定位有所差异,修复目标和策略需因地制宜。例如,利用CLUE-S模型设置自然发展、轻度退耕、适度退耕和强度退耕四种情景,模拟发现适度退耕修复策略有助于在滇西北山区更为均衡地提高碳储存、土壤保持、产水和粮食供给服务,达到综合最优的生态修复效果<sup>[34]</sup>。因此,国土空间生态修复可借助土地利用变化模拟模型等辅助手段,通过景观多功能性视角针对修复效果整体最优或特定修复目标优选修复策略,实现综合效益最大化。



### 2.3 生态安全格局——空间优化

生态安全格局依据格局与过程的互馈作用，在满足人类愿景与偏好的基础上缓解生态保护修复与社会经济发展之间的矛盾，有效调控生态过程、保障生态功能，实现区域自然资源有效配置，确保必要的生态和物质福利<sup>[5]</sup>，已成为国土生态修复的重要空间优化途径。景观的构成可以分为斑块、廊道和基质；关注物质、能量和生物在景观中的流动，某些斑块、廊道对维持区域生态过程具有关键意义。基于自然生态过程与人类生态需求的空解析，通过识别重要的斑块、廊道和节点，构建生态安全格局，能够对区域生态系统数量结构与空间格局进行优化，有效连通孤立的景观要素，以最低成本恢复、提升区域生态系统的整体功能，实现生态、经济、社会效益综合最优。生态安全格局目前已逐步形成了“源地—廊道—战略点—网络”的构建范式，契合了国土空间治理从“被动修复”向“主动适应”的转变需求，形成了基于结构完整性、功能稳定性、空间连通性的一体化景观优化途径。

基于多目标生态要素叠加、生态过程整合分析、生态系统服务供需均衡、生态保护红线划定等方法，生态安全格局综合考虑社会经济系统的发展偏好与自然生态系统的本底约束，通过“源地识别—阻力面构建—廊道提取—战略点判别—网络构建”优化生态空间格局配置，能够促进生态修复工程从多、乱、散向系统化、网络化转变。由于地球表层系统等级组织的复杂性，不同尺度国土空间面临不同的生态环境问题，其社会过程与生态过程的作用关系也各不相同，国土空间生态修复需面向生态、经济、社会问题与目标构建国家、区域、局地等多等级的生态安全格局，对应“五级”国土空间规划形成不同层级的国土空间生态修复网络体系。

### 2.4 景观可持续性——福祉保障

景观生态学关注点从生态系统服务到景观可持续性的延伸，体现了从关注生态系统服务的潜在供给外延至生态系统对人类福祉长期提升的贡献。新时期国土空间生态修复需建立国土空间生态修复的多尺度级联框架，统一保护、修复与整治以全面提升景观可持续性。作为人和环境相互作用的基本空间单元，景观和区域是可持续过程和机理研究最具可操作性的空间尺度，也是有效研究和维系可持续性的最小空间尺度。景观可持续性研究景观格局、生态系统服务和人类福祉间的动态关系<sup>[36]</sup>，主要体现在经济、美学、环境、道德、公平和体验等六个维度<sup>[27]</sup>，关注生态系统过去、现在和未来时间尺度上提供服务和产品的能力。国土空间生态修复旨在从人类的福祉出发恢复生态系统结构和功能的完整性，维持其长期提供产品和服务的能力。因此，国土空间生态修复与景观可持续性具有共同的目标，在实践中应强化景观可持续性的时间动态视角，统一生态保护、生态修复与国土整治；这三者既对应过去以来具有重要生态价值、目前遭受破坏产生退化与处于胁迫状态的三类生态系统（可能存在空间交互作用），也表征同一生态系统的三种可能变化状态。

同时，基于景观可持续性的多维度特性明确国土空间生态修复的内涵和目标，对应景观、区域、全国尺度，从国家、省、市、县和乡镇五级构建多尺度级联框架，达到经济、环境、美学等协同最优，并通过对景观可持续性六个维度需求的动态变化制定具有前瞻性、弹性的福祉保障体系。面向国土空间生态修复自上而下、自下而上途径的整合，国土空间生态修复自上而下开展顶层设计时，应在国家和区域尺度把握生态系统的

整体性, 重点关注难以人为替代的生态产品及服务, 确保人类福祉和生态系统服务的长期提升; 自下而上开展国土空间生态修复时, 应强调小尺度的社会—生态过程, 注重调控景观组分类型、数量和空间布局, 保障生态功能的稳定性。

生态补偿建立了从生态系统服务消费者向生产者的负向联系, 并与生态系统服务流的正向联系一起构成完整闭合链条, 是实现国土空间生态修复效用长期稳定发挥的有效操作路径。目前, 生态补偿多应用于水体、耕地和林地的生态修复<sup>[37]</sup>, 且局限于植被和水体的保护恢复, 欠缺对土壤、大气等领域的关注<sup>[38]</sup>。面向景观可持续性的国土空间生态修复应从生态产品多维价值永续发展的视角出发, 推动流域上下游、跨流域和行政区间间的生态补偿, 进而同步协同环境保护、生态修复和社会经济发展。

### 3 结语

国土存量时代要求实现以最小的自然资源利用满足最大的区域发展需求, 倒逼国土综合整治、生态环境保护、国土空间生态修复, 综合提升国土空间品质。但传统的生态修复大多关注小尺度局地生态系统, 难以满足新形势下国土空间多尺度、多功能协同最优的发展需求, 尤其是难以纳入社会系统对生态系统的需求和影响, 亟需引入多尺度社会—生态耦合理论与方法。景观生态学以不同生态系统构成的地表综合体——景观为基本研究对象, 聚焦多尺度景观格局演变及其社会—生态过程响应, “格局与过程耦合—时空尺度—生态系统服务—景观可持续性”的研究路径则提供了从机理到应用的完整链条, 为基于过程耦合、空间集成的景观保护、利用和修复, 实现自然资源优化配置提供了认知基础和实践途径。国土空间生态修复可依据格局—过程互馈机理识别退化、受损的生命共同体, 基于景观多功能性权衡视角协调社会—生态需求并确定修复的目标, 应用生态安全格局优化多层级修复网络体系, 建立面向景观可持续性的多尺度级联福祉保障, 从而通过整体保护、系统修复达到生态系统服务和人类福祉的有效提升。

### 参考文献(References):

- [1] STEFFEN W, CRUTZEN P J, MCNEILL J R, et al. The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of Nature?. *AMBIO*, 2007, 36(8): 614-621.
- [2] 沈悦, 刘天科, 周璞. 自然生态空间用途管制理论分析及管制策略研究. *中国土地科学*, 2017, 31(12): 17-24. [SHEN Y, LIU T K, ZHOU P. Theoretical analysis and strategies of natural ecological space use control. *China Land Sciences*, 2017, 31(12): 17-24.]
- [3] 王静, 周伟奇, 许开鹏, 等. 京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响. *生态学报*, 2017, 37(21): 7019-7029. [WANG J, ZHOU W Q, XU K P, et al. Spatiotemporal pattern of vegetation cover and its relationship with urbanization in Beijing-Tianjin-Hebei Megaregion from 2000 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21): 7019-7029.]
- [4] 王聪, 伍星, 傅伯杰, 等. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向. *生态学报*, 2019, 39(20): 7333-7343. [WANG C, WU X, FU B J, et al. Ecological restorations in the key ecologically vulnerable regions: Current situation and development direction. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7333-7343.]
- [5] LIU J G, LI S X, OUYANG Z Y, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *PNAS*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- [6] 吴丹丹, 蔡运龙. 中国生态恢复效果评价研究综述. *地理科学进展*, 2009, 28(4): 622-628. [WU D D, CAI Y L. Evaluation of ecological restoration effects in China: A review. *Progress in Geography*, 2009, 28(4): 622-628.]
- [7] 魏远, 顾红波, 薛亮, 等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展. *中国水土保持科学*, 2012, 10(2): 107-114. [WEI Y, GU H B, XUE L, et al. Review of studies on reclamation and ecological restoration of abandoned land of mine. *Sci-*



- ence of Soil and Water Conservation, 2012, 10(2): 107-114.]
- [8] 王志强, 崔爱花, 缪建群, 等. 淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展. 生态学报, 2017, 37(18): 6253-6264. [WANG Z Q, CUI A H, MIU J Q, et al. Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(18): 6253-6264.]
- [9] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. 生态学报, 2019, 39(20): 7432-7440. [WANG K L, YUE Y M, CHEN H S, et al. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7432-7440.]
- [10] 王夏晖, 何军, 饶胜, 等. 山水林田湖草生态保护修复思路与实践. 环境保护, 2018, 46(3): 17-20. [WANG X H, HE J, RAO S, et al. Design of implementation path of ecological engineering for ecological protection and restoration of multi ecological elements. *Environmental Protection*, 2018, 46(3): 17-20.]
- [11] 彭建, 杨旸, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572. [PENG J, YANG Y, XIE P, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong province based on the supply and demand of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4562-4572.]
- [12] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4363-4372. [LIU J, YIN H W, KONG F H, et al. Structure optimization of circuit theory-based green infrastructure in Nanjing, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4363-4372.]
- [13] 侯现慧, 赵敏娟, 刘婧鸣, 等. 基于生态协调性和建设适宜性的山区基本农田布局研究: 以福建省永安市为例. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2167-2182. [HOU X H, ZHAO M J, LIU J M, et al. Research on the basic farmland distribution in mountainous areas based on ecological harmony and construction suitability. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2167-2182.]
- [14] PENG J, PAN Y J, LIU Y X, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [15] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771-784. [HUANG M Y, YUE W Z, FENG S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain area. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 771-784.]
- [16] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1-10. [CAO Y, WANG J Y, LI G Y. Ecological restoration for territorial space: Basic concepts and foundations. *China Land Science*, 2019, 33(7): 1-10.]
- [17] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington D C: Island Press, 2005.
- [18] 魏巍, 冯晶. 城市生态修复国际经验和启示. 城市发展研究, 2017, 24(5): 13-19, 55. [WEI W, FENG J. International experience and enlightenment of urban ecological restoration. *Urban Development Studies*, 2017, 24(5): 13-19, 55.]
- [19] LORENZ A W, JAHNIG S C, HERING D, et al. Re-meandering German lowland streams: Qualitative and quantitative effects of restoration measures on hydromorphology and macroinvertebrates. *Environmental Management*, 2009, 44(4): 745-754.
- [20] KOCH J M, HOBBS R J. Synthesis: Is Alcoa successfully restoring a jarrah forest ecosystem after bauxite mining in Western Australia?. *Restoration Ecology*, 2007, 15(4): 137-144.
- [21] 董祚继. 新时代国土空间规划的十大关系. 资源科学, 2019, 41(9): 1589-1599. [DONG Z J. Ten relations of territorial planning in the new era. *Resources Science*, 2019, 41(9): 1589-1599.]
- [22] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2007. [WU J G. *Landscape Ecology: Pattern, Process Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2007.]
- [23] 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. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973. [PENG J, HU X X, ZHAO M Y, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 960-973.]
- [24] 孙然好, 李卓, 陈利顶. 中国生态区划研究进展: 从格局、功能到服务. 生态学报, 2018, 38(15): 5271-5278. [SUN R H, LI Z, CHEN L D. Review of ecological regionalization and classification in China: Ecological patterns, functions,

- and ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5271-5278.]
- [25] 刘焱序, 傅伯杰, 赵文武, 等. 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. [LIU Y X, FU B J, ZHAO W W, et al. Ecological asset accounting and ecosystem services evaluation: Concept intersection and key research priorities. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23): 8267-8276.]
- [26] 柳荻, 胡振通, 靳乐山. 生态保护补偿的分析框架研究综述. *生态学报*, 2018, 38(2): 380-392. [LIU D, HU Z T, JIN L S. Review on analytical framework of eco-compensation. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 380-392.]
- [27] 赵文武, 房学宁. 景观可持续性景观可持续性科学. *生态学报*, 2014, 34(10): 2453-2459. [ZHAO W W, FANG X N. Landscape sustainability and landscape sustainability science. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2453-2459.]
- [28] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 等. 国际景观生态学研究新进展. *生态学报*, 2008, 28(2): 798-804. [FU B J, LYU Y H, CHEN L D, et al. The latest progress of landscape ecology in the world. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 798-804.]
- [29] 黄宁, 王红映, 吝涛, 等. 基于“源—汇”理论的流域非点源污染控制景观格局调控框架: 以厦门市马銮湾流域为例. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3325-3334. [HUANG N, WANG H Y, LIN T, et al. Regulation framework of watershed landscape pattern for non-point source pollution control based on "source-sink" theory: A case study in the watershed of Maluan Bay, Xiamen city, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3325-3334.]
- [30] 孙天成, 刘婷婷, 褚琳, 等. 三峡库区典型流域“源”“汇”景观格局时空变化对侵蚀产沙的影响研究. *生态学报*, 2019, 30(20): 7476-7492. [SUN T C, LIU T T, CHU L, et al. Effect of temporal and spatial variations in source-sink landscape patterns on soil erosion and sediment yield from typical watershed in the Three Gorges Reservoir area, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 30(20): 7476-7492.]
- [31] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444-1449. [CHEN L D, FU B J, ZHAO W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444-1449.]
- [32] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架. *地理学报*, 2019, 74(8): 1489-1507. [LIU H M, FANG C L, LI Y H. The Coupled Human and Natural Cube: A conceptual framework for analyzing urbanization and eco-environment interactions. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1489-1507.]
- [33] WANG J T, PENG J, ZHAO M Y, et al. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in Northwestern Yunnan, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 57-64.
- [34] PENG J, HU X X, WANG X Y, et al. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in Northwestern Yunnan, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39, 100998. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100998>.
- [35] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [36] WU J G. Linking landscape, land system and design approaches to achieve sustainability. *Journal of Land Use Science*, 2019, 14(2): 173-189.
- [37] DENG H B, ZHENG P, LIU T X, et al. Forest ecosystem services and eco-compensation mechanisms in China. *Environmental Management*, 2011, 48(6): 1079-1085.
- [38] 林慧, 马永欢. 生态补偿制度的改革路径. *中国土地*, 2019, (5): 26-28. [LIN H, MA Y H. The reform path of ecological compensation system. *China Land*, 2019, (5): 26-28.]

## Processes coupling and spatial integration: Characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology

PENG Jian<sup>1,2</sup>, LYU Dan-na<sup>2</sup>, DONG Jian-quan<sup>1</sup>, LIU Yan-xu<sup>3</sup>, LIU Qian-yuan<sup>2</sup>, LI Bing<sup>1</sup>

(1. Ministry of Education Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The core of ecological restoration of territorial space is the holistic protection and systematic governance in the new period. It emphasizes the synergies between ecological conservation and socio-economic development. Landscape ecology focuses on the dynamics of landscape structure and function, and the interactive mechanism between them and human society from a comprehensive perspective, especially paying attention to processes coupling and spatial integration. The approach of "coupling patterns and processes-spatial and temporal scale-ecosystem services-landscape sustainability" in landscape ecology can provide significant disciplinary support for ecological restoration of territorial space. In the practice of ecological restoration of territorial space, pattern-process coupling theory should be employed to identify degraded or damaged life community of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes and grasslands. Ecosystem services tradeoffs of multifunctional landscape for balancing social, economic and ecological demands are used to determine ecological restoration targets. For systematic restoration, the ecological security pattern is an effective way to optimize a multi-level restoration network, and the multi-scale cascade framework for human well-being safeguard can be built based on landscape sustainability.

**Keywords:** ecological restoration of territorial space; landscape ecology; processes coupling; spatial integration