

国外生态修复研究进展评述

张瑶瑶¹, 鲍海君², 余振国³

(1. 浙江财经大学土地与城乡发展研究院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江财经大学公共管理学院, 浙江 杭州 310018; 3. 中国自然资源经济研究院, 北京 101149)

摘要: 研究目的: 系统总结国外生态修复研究的重点进展和主流共识, 为把握未来生态修复研究的前沿态势提供参考。研究方法: 文献研究法。研究结果: 按照生态修复的“目标导向—技术方法—成效评价”的框架进行梳理, 现有研究在生态修复的对象及尺度、生态学及社会经济文化目标、各类型生态系统及要素的修复技术方法、成效评价维度及指标等方面取得了一定的研究进展, 但总体而言, 目前生态修复研究存在理论—实践—政策之间知识转移欠缺、生态学与社会经济学科交叉研究不足、全球气候变化背景下的研究缺乏等问题。研究结论: 理论—实践—政策耦合研究、生态学—社会经济学科交叉研究、气候变化—生态修复联动研究等可能是未来生态修复领域的重点研究方向。

关键词: 土地生态; 生态修复; 综述; 研究展望

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-8158(2020)07-0106-09

生态系统为人类提供供应服务、调节气候、文化服务、支持服务等多方面的生态、社会和经济服务功能^[1]。然而, 人类活动及气候变化正在给全球生态系统带来巨大的负面影响, 导致生态系统大规模退化、全球生物多样性降低、人为污染日趋严重等生态环境危机, 使得生态系统提供产品及服务功能的能力受到极大损害, 危及人类社会的可持续发展。为解决这些问题, 生态修复作为一门学科出现, 旨在协助恢复已经退化、受损或被破坏的生态系统^[2]。生态修复具有逆转生态系统退化、增强生态系统服务、改善人与自然关系、抵御未来环境变化等潜力, 正日益成为从地方到全球层面的主流政治议题和优先事项, 被广泛纳入自然资源管理框架和可持续发展战略^[3]。

在当前中国生态文明建设的大背景下, 国土空间生态修复作为重要举措之一, 也正在得到全方位推进。目前国土空间生态修复在理论思想方面取得了重要研究进展, 如概念内涵的辨析^[4]、基本逻辑的厘定^[5]、思想内涵及实现途径的总结^[6]、转型路径及策略的探讨^[7]、时空整合视角下的认知转变^[8]、修复途径的范式归纳^[9]、工程内涵及创新对策的思考^[10]等。总的来

说, 现有研究多聚焦于系统性、整体性、综合性等特性认识, 而在国土空间生态修复的理论基础及技术支持等方面的研究尚较薄弱、实践案例尚不多见, 尤其是针对人地复合生态系统的生态修复研究, 仍很缺乏。

生态修复研究可追溯至欧美等国在20世纪初对自然资源的管理和保护性利用。在20世纪60—70年代经济高速增长带来严重环境危机的背景下, 生态修复问题被发达国家提到重要位置, 构建了一系列法律法规体系, 积累了丰富的理论研究和实践经验。20世纪70年代末, 生态修复作为正式的研究领域出现, 进一步促进了相关理论及实践研究的蓬勃发展, 生态修复领域的国际专业杂志和文章数量也迅速增加。在中国当前生态文明建设快速推进的阶段, 总结国外生态修复理论与方法研究的成果, 能够为新时期国土空间生态修复提供科学参考。

生态修复的理论与方法研究, 主要涉及3方面核心内容: 修复对象、修复尺度、目标模式等目标导向的研究, 修复方案、工程技术、方法创新等技术方法的研究, 以及监测体系、评价指标等成效评价的研究^[10]。因此, 本文基于生态修复的“目标导向—技术方法—成

收稿日期: 2020-04-18; 修稿日期: 2020-05-26

基金项目: 乡村治理现代化的田野实验、行为实验与政策仿真(20JDZD022)。

第一作者: 张瑶瑶(1989-), 女, 浙江台州人, 博士后。主要研究方向为生态评价与生态修复。E-mail: zhangyaoyao@zufe.edu.cn

通讯作者: 鲍海君(1977-), 男, 浙江台州人, 博士, 教授。主要研究方向为土地管理。E-mail: baohaijun@zufe.edu.cn

效评价”的框架,系统梳理国外生态修复理论与方法的研究进展与主流认识,并对该领域的发展趋势进行评述,以期为把握生态修复研究的前沿态势提供参考。

1 生态修复的目标导向

生态修复的有效实践有赖于对其目标导向的科学认知。生态修复的目标通常被认为是生态修复中最重要的组成部分,设定了生态修复实践的期望、指导行动计划的具体方案,及后期监测评价的类型和程度^[11]。确定生态修复的目标导向,首先需要明确生态修复的对象,生态修复对象决定了生态修复的具体内容。鉴于生态修复本质上是自然与社会系统的博弈过程,因此,生态修复的目标应当涵盖生态学目标及社会、经济、文化等社会系统的目标。

1.1 生态修复的对象

对应于生态修复的多样化动机,生态修复的尺度及相应的目标涉及多种层面,从特定物种、群落,到整个生态系统及景观的修复^[12]。以生态系统/景观为中心的生态修复,与以种群为中心的生态修复,是生态修复的两个端元类型。其中,以种群为修复对象的生态修复,目标直观,通常指向拯救濒危物种、增加生物多样性等。种群修复常通过营造适宜的生境使物种回归,但这必然伴随着对更大规模生态过程(如物种与栖息地的相互作用等)的修复要求^[13],因此,将生态系统尺度的管理作为生态修复的组织框架逐渐展现出优势。以生态系统/景观为中心的生态修复,涉及对生态系统整体的综合功能和动态本质的深入认识,既关注生态系统级别的动态过程,也重视与物种、土壤生态等小规模过程的相互结合,鼓励发展同时有利于宏观、微观尺度生态过程的修复措施^[14]。以生态系统为中心的生态修复,有利于综合不同部门、利益相关方的生态修复目标,因此,在欧美等国已成为设定生态修复目标的最常用对象^[15-16]。如国际生态修复学会(Society for Ecological Restoration, SER)提出生态修复的普适性指导标准,即以生态系统修复为中心^[11]。此外,在当前全球生态环境破坏加剧、生态修复需求激增的背景下,宏观尺度生态修复的规模经济、累积价值等得到了关注,如为应对气候变化,国际大规模生态修复项目层出不穷,以期通过增加动、植物生物量(包括土壤中的生物量)来大幅提高碳封存效率。

1.2 生态学目标

SER提供了生态系统修复的指导标准:尽可能将生态系统恢复到一种适应本地的自然模式^[11]。归纳来说,这一标准主要考虑对生态属性的修复,指出了修复后的生态系统所必须具有的物种组成和结构、生态功能及动态等方面的9个特征。本文对涉及生态修复研究的7 084篇文章^①,利用CiteSpace进行词频统计(剔除restoration、ecological restoration、restoration ecology)(表1),结果表明前10个高频词中,有5个与生态属性密切相关:vegetation(植被,866次)、biodiversity(生物多样性,806次)、species richness(物种丰富度,586次)、community(群落,535次)、ecosystem(生态系统,507次),此统计结果验证了“生态学目标”在生态修复研究中的主导地位。

当前快速的全球变化趋势对生态环境施加着强烈的、不确定的影响,因此,生态修复目标的制定应当具有弹性,以适应各种生态修复实践动机^[17]。按照预期目标与参照生态系统的接近程度(主要涉及威胁消除、物理状态、物种组成、群落结构、生态系统功能、外部交流6个关键生态属性类别),生态修复被划分为从基本缓解到完全修复5个不同等级^[17]。开展生态修复项目之前,需要确定预期目标是达到“五星级”的完全修复,抑或侧重于恢复某种生态系统功能,据此设定详细的约束指标及参数范围^[18]。对于大规模的生态修复项目,制定侧重于恢复生态功能的目标将更为合理高效,如国际森林景观恢复项目“波恩挑战”(Bonn Challenge)^[19]。

恢复生态学近年来强调恢复阈值的概念,即何时生态系统可以独立地自我恢复而不再需要人工干预^[20]。恢复阈值本质上是阻碍退化生态系统恢复的关键因素,可能是生物因素(如外来物种入侵、过度放牧等)抑或非生物因素(如水文、土壤结构变化等)^[21]。生态修复旨在阻遏生态系统恶化的趋势,因此至少需要越过恢复阈值,达到具有弹性和可持续性生态系统这一中间目标。生态修复的实践经验也表明,激发区域内的自我恢复潜力是生态修复项目的主要原则之一^[22]。

1.3 社会、经济、文化目标

生态修复是应全球生态环境危机而产生的学科,本质上是为了缓解人与自然的发展矛盾。因此,在生态修复项目中隐含着决策者、管理者、科学家以及各利益相关方的价值体系。当前对生态修复的研究中,

①筛选自Web of Science数据库,检索日期为2020年5月20日,检索语句为TS=(“ECOLOGICAL RESTORATION”OR“RESTORATION ECOLOGY”)及SO=(“RESTORATION ECOLOGY”),获取7 611条结果。利用CiteSpace剔除重复项,保留的文章时间跨度为1991—2020年。

“人”的因素逐渐得到重视,社会、经济、文化等属性的重要性逐渐被强化^[23]。

生态修复的社会属性,一方面体现在对生态系统服务功能的修复,以提高人类的生活质量。将生态系统的生物物理条件与人类福祉相结合的“社会—生态系统(Social-Ecological Systems, SESs)”研究逐渐得到关注^[24]。另一方面,社会因素在生态修复中发挥重要作用,如政治因素(详尽的生态修复法令)被认为是巴西大西洋森林长达数十年生态修复项目的最有效动力之一^[25]。在制定和实现生态修复目标时,需要将社会因素(如政府法规、公共政策、合作网络、社会文

化、科技水平等)考虑在内。

如何衡量生态修复所带来的经济利益,也逐渐被纳入到生态修复研究中,成本—效益分析已经成为生态修复项目设计中的重要组成部分^[26]。研究如何为生态修复项目所恢复的生态系统服务赋予经济价值,已经逐渐进入主流视野^[27-28]。

当前对于生态修复中的文化属性研究尚不多^[29],尚未形成相对统一的标准。SER曾提出“文化—生态系统”的概念^[1],但对其定义尚存颇多争论^[24],例如,如何定义何为“自然的”,何为“人为的”/“文化的”?采用工业化之前/之后,作为“自然的”与“文化的”的界限,

表1 生态修复研究领域高频关键词(1991—2020年)

Tab.1 High frequency keywords in ecological restoration research (1991-2020)

词组	词频	词组	词频	词组	词频
vegetation	866	forest restoration	264	habitat restoration	157
conservation	820	population	244	vegetation cover	156
biodiversity	806	loess plateau	240	carbon	154
management	744	restoration effort	229	community structure	153
diversity	743	response	228	vegetation restoration	148
climate change	620	regeneration	225	restoration treatment	145
ecosystem service	617	invasive species	225	natural regeneration	144
species richness	586	competition	211	ecosystem restoration	142
community	535	plant species	210	biodiversity conservation	142
ecosystem	507	revegetation	210	land	141
forest	501	species diversity	204	plant diversity	139
growth	485	water quality	199	bioma	136
dynamics	438	China	195	seed dispersal	135
restoration project	436	human activity	194	tree species	130
plant community	418	wetland	186	organic carbon	129
soil	405	dispersal	185	important role	129
pattern	404	ecosystem function	184	spatial pattern	127
plant	399	prescribed fire	182	reference site	127
succession	350	seed bank	177	survival	126
grassland	340	germination	177	climate	126
native species	328	water	175	genetic diversity	126
disturbance	317	significant difference	173	river	125
landscape	304	rehabilitation	172	tropical forest	123
establishment	301	soil erosion	169	community composition	123
land use	285	recovery	166	invasion	122
organic matter	274	model	165	recruitment	122
fire	273	growing season	165	carbon sequestration	114
species composition	271	restoration site	164	land use change	114
habitat	270	restoration success	158	river restoration	113
nitrogen	264	soil property	158	adaptive management	113

是否合理? 不过, 将文化属性纳入到生态修复目标中, 这一认识已植根于发达国家的生态修复实践中。鉴于文化的区域差异性, 应当基于不同的地方性文化的框架, 阐释人与自然的关系, 开展地方性的生态修复工作。

综上, 生态修复目标的确定需要采用综合视角, 基于生态、经济和社会现实, 实现生态修复中生态—社会要素的有机结合, 帮助生态系统获得可持续发展的能力, 提升生态系统服务能力及人类福祉, 这也契合了国土空间生态修复所强调的人地复合生态系统定位^[9]和系统性、整体性及综合性视角^[4]。

2 生态修复的技术方法

2.1 从生态系统类型的角度

生态修复技术方法是生态修复研究的重点领域。对筛选的资源环境科学类期刊的文章词频统计显示, 生态修复技术方法研究涉及森林、草原、湿地、河流、矿区以及珊瑚礁、盐沼等各种生态系统, 其中草地、森林和河流/湿地(统称水体)生态系统是生态修复的热点领域(表1)。这三类生态系统也是陆地生态系统的主要组成部分, 是生物的主要栖息地, 对于生态系统服务功能的提供是至关重要的。生态修复工程通常倾向于在生态系统和景观尺度上开展, 而非更小的物种或群落尺度, 这呼应了当前生态修复以生态系统/景观作为组织框架的趋势^[15]。由于不同的退化生态系统在地域、外部干扰类型及强度等方面各有差别, 生态系统所展现的退化类型、阶段及相应的响应机制各不相同, 因此所采用的修复技术也不尽相同。

总的来说, 生态修复的技术方法, 从废弃景观的自然再生(被动手段)到劳动、资本密集的干预措施(主动手段), 具有多样化的选择。其中, 积极的修复技术(如播种、栽种等)应用相对更多, 而被动的的方法(如移除破坏源)较少被采用; 与被动方法相比, 主动方法通常更昂贵, 但效果更显著^[30]。生态修复项目的时间尺度多为中等—长时间(5~15年), 以便确定更适用的、效果更佳的、相对更可持续的生态修复方法^[29]。针对不同的生态系统类型, 其关注对象各有侧重, 在具体修复方法的选择上也各具差异。例如, 对于森林、草原、湿地、矿山生态系统的修复技术研究, 多关注对植物的修复及相应的土壤性质改善, 重视植被结构、丰度等指标; 对于河流生态系统的修复, 多强调对动物(如鲑鱼、无脊椎动物等)的恢复, 关注动物丰度指标。

在河流生态修复实践中, 地理信息系统(GIS)、遥

感(RS)技术在生态修复选址中得到广泛应用, 通过对水文地貌学等指标(如地形、基质类型、土壤覆盖、植被覆盖、洪泛、扰动状态等)的遥感解译, 对流域内的各潜在生态修复站点的修复迫切性、潜在适宜性等进行优先级排序^[31]。草地生态修复强调通过土壤性质的改善(如焚烧、表土去除、深耕、覆盖有机物等)来促进草地植物群落建立^[32], 但修复实践显示, 即使是长时间跨度的修复项目, 也难以恢复草地生态系统的生物多样性, 因此选择预先保护, 而非破坏之后再修复, 是更好的草地生态系统管理策略。在森林生态修复技术中, 一种传统的干预和修复手段——计划烧除, 受到了广泛关注(表1中, prescribed fire作为高频词出现), 作为一种效果与风险并存的生态修复手段, 计划烧除如何开展、何时开展仍存争议^[33]: 该方法具有促进土壤微生物群落发展、提高土壤肥力等积极作用, 但也可能导致土壤有机物含量下降等负面影响。湿地生态修复中, 针对多样化的修复对象(如潮汐盐沼、红树林湿地等海岸带湿地, 以及内陆淡水沼泽、泥炭湿地、河岸湿地等内陆湿地), 其修复技术各有侧重, 涵盖适宜的水文学恢复、特殊生境与景观的再造、入侵物种的控制、植物的再引入与植被恢复、物种多样性的恢复等多方面^[34]。矿山生态修复项目常侧重于采用积极的人工修复技术, 如在植被修复方面, 关注固氮植物、吸附重金属植物、耐受性植物等的优选, 在土壤修复方面, 采用添加石灰、钙基膨润土、覆盖木纤维等方法直接改善土壤性质^[35], 此外, 矿山景观修复成为当前的研究主流, 如加强斑块的联通性、地貌重塑、采场排水系统与地面水系的有机联系等, 以增加修复后景观与周边区域的协调性^[35]。

2.2 从生态系统要素的角度

从生态系统要素的角度, 生态修复技术主要涉及对非生物环境要素(如土壤、水体、大气)的修复技术、对生物因素(物种、种群和群落等)的修复技术、对生态系统及景观(如结构、功能)的总体设计及集成技术^[34]。对非生物环境要素的修复, 如采用免耕、绿肥施用、化学改良等技术手段进行土壤肥力恢复, 采用生物篱笆等耕作技术手段进行水土流失控制与保持, 采用土壤生物自净、增施有机肥、深翻埋藏、废弃物资源化利用等技术手段进行土壤污染控制与恢复, 采用生物吸附、烟尘控制、新能源替代等技术手段开展大气污染控制与恢复, 采用物理、化学、生物等处理手段开展水体污染控制等。在生物要素修复方面, 通过物

种选育与繁殖技术(如基因工程、野生生物物种驯化等)、物种引入与恢复技术(如先锋种引入、天敌引入等)修复物种,采用物种保护、种群动态调控、种群行为控制等技术修复种群,通过群落结构优化配置、群落演替控制等技术修复群落。在生态系统的结构与功能修复方面,常采用环境/土地资源/景观生态等评价与规划技术、生态工程/景观设计等生态系统组织与集成技术^[34]。

最近30年来生态学及恢复生态学理论的发展(如生态位、岛屿生物地理学、状态过渡模型及阈值、人为设计与自我设计、弹性生态系统等),极大地促进了生态修复技术方法的发展更新^[36]。生态修复技术的最新进展,从植物的种子资源恢复技术、动物在植被修复中的辅助作用,到高通量DNA测序、GPS-RS-GIS等高新技术在修复中的应用,涵盖了生态系统的非生物、生物要素及结构、功能等各个方面。在植物修复方面,种子库概念及相关技术方法的发展(表1中,seed bank作为高频词出现),为大规模收集、处理可育性种子提供了有效方法^[37],种子处理、加工及质量评估技术的改进(如X射线种子生存力分析、非原生境存储技术、种子发芽刺激剂等)、种子增强技术的发展(如聚合物种子包衣技术)、对成熟农业播种技术的改良等,也对生态修复中的植被重建起到辅助作用^[38]。在动物修复方面,动物物种在辅助恢复植物群落功能中的重要性逐渐受到重视,一方面,改变动物群落结构可重塑生态系统的组成和结构,如顶级掠食者通过对食草动物种群及其行为的作用来重塑植物群落的结构^[39],另一方面,动物在生态系统中所起的诸如种子传播、授粉、养分循环等作用,也对生态修复具有重要意义^[40]。在生态系统非生物要素修复方面,高通量DNA测序和功能基因分析的最新技术进展,可以快速评估生态系统中的功能基因、了解系统的多样性,为改善生态修复效果提供依据^[41]。在生态系统结构、功能修复方面,RS-GIS-GPS技术的应用进展,可以为大规模生态修复提供辅助,如生态环境监测预警、环境评价、生态修复选址及设计等^[42]。

总的来说,生态学及恢复生态学的概念性和技术性发展,已经在生态修复实践中得到了重要的应用,生态修复技术方法层出不穷,对修复效果的实践案例也日益积累。但是,国土空间生态修复涉及面广、修复工程类型多,需要多技术协同运用,仍需在借鉴国外研究与实践的基础上,因地制宜,深入研发,实现自

然修复与人工干预的有机融合,工程、生物、化学、物理等多种类技术手段协同运用,形成国土空间生态修复最佳设计范例和技术方法组合^[10]。

3 生态修复成效评价

对生态修复开展科学准确的成效评价,对于验证生态修复在自然资源管理中的作用、调整优化生态修复实践方案、鼓励生态修复的科研和实践投入至关重要^[43]。学者对于成功的生态修复标准进行了广泛的辩论(表1中,restoration success作为高频词出现),认为生态修复目标、全球气候—环境变化、社会经济环境背景等因素都会影响对生态修复成效的定义和衡量。对于生态修复的成效评价,最常被提及的就是生态修复的各项目标是否一一实现。然而,一方面,生态修复目标制定具有理想化的特性,另一方面,当前快速的全球气候、社会经济环境变化,常导致原定修复目标不再适用,因此,生态修复成效评价不应仅局限于初始目标。从广义上来说,除了要达到改善生态属性、获取社会经济效益等目标之外,促进科学研究及管理实践的进步等维度,也应被纳入生态修复成效评价中,最有效的生态修复应当位于各维度的交汇处^[44]。

总体而言,目前已开展的关于生态修复成效评价的研究,主要关注了生态属性,如SER对于生态修复成功的标准强调了生态属性,恢复后的生态系统应满足结构、功能和动态方面的9个关键特征^[2]。而事实上,考虑到时间和经济成本,以及指标的可测性,在实践中极少有项目可以设计并统计SER提出的所有评估指标^[26],例如,生态系统的自我可持续性长期属性,很难在项目时间框架内完成测量。已有生态修复实践案例中最常采用的成效评价指标,可归纳为植被结构、生物多样性和丰度、生态过程3类^[29]。其中生物多样性和丰度是最常用的衡量指标,如物种组成、物种冗余度、遗传适应性、植物多样性和丰度、动物多样性和丰度等。这类指标可指示生物对于栖息地的适宜性,以及物种继承状态、区域内传播机制和生态系统过程等。植被结构是快速评估区域生态条件的有效手段,但指标(如植被密度、植被分层结构等)统计结果常因人而异,因此较少单独使用。随着生态修复项目实施时间的增加,生态过程(或生态功能)指标,如营养循环、土壤结构或稳定性、传播机制、繁殖成功等长周期指标获得了更多关注^[29],可指示修复后生态系统的复原力、稳定性及其与周围景观之间的协调性。

此外,社会经济效益逐渐被纳入生态修复的成效评价中^[27,45-46],这对于获取政策制定部门、资金管理机构、投资方及民众对生态修复实践项目的支持是至关重要的。如何衡量生态修复所蕴含的社会经济价值,已成为当前研究热点之一。如利用或有估价法、机会成本法、成本—收益分析法等经济学方法^[43],采用社区的环境保护意识、对生态修复项目的参与意愿及参与程度等指标体系^[47],衡量生态系统及其生态服务功能恢复的社会经济价值。

综上,综合评估生态修复的生态成果及社会经济收益,可以明确生态修复成效的关键要素,更全面地回答生态修复实践的有效性。生态修复成效评价的理论研究进展和实践案例,可以为国土空间生态修复的科学研究及管理实践水平的提升提供参考,为构建国土空间生态修复的监测及成效评价指标体系提供指导。

4 生态修复研究展望

生态修复领域的相关研究,旨在解决当前和未来受人类影响的生物圈中的环境问题,提升生态系统的生态服务功能及人类福祉。现有研究在生态修复的目标导向、技术方法、成效评价等方面取得了大量进展,但仍存在理论—实践—政策之间知识转移欠缺、生态学与社会经济学学科交叉研究不足、全球气候变化背景下的生态修复研究相对缺乏等问题^①。如生态学和恢复生态学的最新理论研究进展,如何有效地转化为生态修复实践及政策制定中的参考指南;生态修复项目的优先级决策、社会经济利益的合理评估,仍亟需生态学与经济学、社会科学等领域联合开展研究;生态修复可以为增强生态系统对环境变化的适应力发挥关键作用,但在全球气候的变化背景下如何合理高效地开展生态修复仍需进一步探索。总体而言,未来,生态修复研究需要在系统集成的视角下,在理论—实践—政策的耦合、生态学—社会经济学科的交叉、气候变化—生态修复的联动等方面进一步深化研究,以发挥各项要素的协同作用,促进全球可持续发展。

4.1 理论—实践—政策耦合研究

随着生态修复理论和实践的进展,不同机构(如研究机构、管理机构、政策制定部门等)、主体(研究者、实践者、政策制定者等)、学科(生态学、经济学、

社会科学等)在生态修复项目中的信息鸿沟进一步放大。一方面,以传统方式发表的科学研究难以顺利应用到项目设计、实施、监测等修复实践中去,因此难以对生态修复实践工作的改进和优化产生明显效果^[48];另一方面,政策法规的强制性效果在生态修复中的关键性作用得到了承认,但政策法规应如何制定才能更好地为生态修复项目服务,目前仍缺乏相关的研究^[49]。

过去30年,生态修复研究取得了显著的概念性、技术性发展,并取得了丰富的应用成果,将使生态修复有潜力持续地应对未来的挑战^[36,43]。鼓励生态修复领域的科学研究机构及人员,与资助和实施生态修复项目的行政及管理部门紧密合作,将促使科研成果纳入到政府部门制定的标准中去,引导生态修复实践部门以尽可能低的成本获得最大的生态效益。如将弹性生态系统、恢复阈值设定等理论和技术进展,应用到生态修复项目的实践指导框架中,将生态修复项目各利益相关方的情景模拟等交叉研究成果,应用到生态修复政策制定中^[50]。

4.2 生态学—社会经济学科交叉研究

生态修复不仅是一个自然的、生态学的过程,也是经济损失、经济投入、价值恢复以及资源开发与管理的社会经济过程,包含着一系列人类价值取向的动机和目标。在生态修复项目中整合自然科学与人文科学的概念框架和研究方法,正逐渐得到研究者的关注^[51]。相较于10年前生态修复研究中社会、经济、政策等要素的缺失^[30],目前越来越多的生态修复研究展现出了生态学、经济学、社会价值之间的交叉,如在量化生态系统服务、量化人类福利、衡量生态修复项目成本—收益等方面取得了可观的进展^[26-27,52]。

考虑到生态修复对人类社会及环境的潜在效益,对生态修复社会经济成果的研究亟待进一步加强,以便更清晰地指出生态修复与经济发展、社会文化进步、人类福祉之间的关联性^[21,36]。人类价值取向在生态修复的多个环节起决定性作用,对于生态修复管理方式的研究,也亟需被纳入整体性考虑,如生态修复项目的优先级决策、生态修复项目的利益分配及潜在冲突,将是未来生态修复研究和实践中的重大挑战之一^[53]。

4.3 气候变化—生态修复联动研究

正在加剧的全球气候变化,已对各类生态系统的结构与功能、生态系统服务产生巨大影响,使许多自

^①利用CiteSpace共被引分析形成文献聚类,最大最新的聚类往往指示其得到大量引用而快速扩展。基于对2个热点聚类中的top40高被引文献的综合分析,进行研究前沿分析及展望。

然生态系统已经转变为与原始状态相去甚远的“新奇生态系统(novel ecosystem)”,同时也可能抵消现有生态修复技术进步带来的优势^[17]。“climate change”(气候变化,620次)作为前10的高频词出现在词频分析表(表1)中,也反映出全球气候变化这一大背景已经进入生态修复研究的主流视野。如全球气候变化下生态系统的响应与反馈机制、生态修复目标制定及技术开发已成为生态修复研究热点问题。全球气候变化背景下的生态修复,开始转向追求生态系统可持续性、过去与未来之间的平衡点、对人类社会的福祉等更为现实的目标,如通过生态修复提高生态系统的弹性和适应力,保留生态系统服务,而非重返昔日原始状态^[54]。

综上,生态修复作为实现可持续发展的重要途径,关系生态安全和民生福祉,其理论与实践研究在近几十年来得到长足发展。生态修复相关研究在地域、理论、学科上逐渐跨越边界,从单一的生态学目标导向、小尺度修复等特征,转向过程导向及适应性恢复、生态与社会经济效益相统一、从地方到全球范围的多尺度修复等特征。未来的生态修复研究,应进一步强调理论与应用之间的结合、生态修复研究人员与实践项目从业人员及政府管理部门之间的合作、自然科学与人文科学的交叉研究、全球气候变化与生态修复的联动研究,从而发挥协同作用,提升全人类福祉,最终实现人类可持续发展。这与生态文明建设背景下的生态修复理念的完善优化相呼应——从生态修复到国土空间生态修复的认知转变、从自然生态系统到人地复合生态系统的概念转变、从单一的生态系统服务供给到人类福祉提升的价值取向转变。

参考文献(References):

- [1] MCDONALD T, GANN G D, JONSON J, et al. International Standards for the Practice of Ecological Restoration—Including Principles and Key Concepts[R]. Washington: Society for Ecological Restoration, 2016: 1–47.
- [2] Society for Ecological Restoration International(SER). The SER International Primer on Ecological Restoration[R]. Tucson: SER International Science & Policy Working Group, 2004: 1–13.
- [3] ARONSON J, ALEXANDER S. Ecosystem restoration is now a global priority: time to roll up our sleeves[J]. Restoration Ecology, 2013, 21(3): 293–296.
- [4] 曹宇,王嘉怡,李国焯. 国土空间生态修复:概念思辨与理论认知[J]. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1–10.
- [5] 彭建,李冰,董建权,等. 论国土空间生态修复基本逻辑[J]. 中国土地科学, 2020, 34(5): 18–26.
- [6] 白中科,周伟,王金满,等. 试论国土空间整体保护、系统修复与综合治理[J]. 中国土地科学, 2019, 33(2): 1–11.
- [7] 王军,应凌霄,钟莉娜. 新时代国土整治与生态修复转型思考[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 26–36.
- [8] 彭建,吕丹娜,董建权,等. 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[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 3–13.
- [9] 王志芳,高世昌,苗利梅,等. 国土空间生态保护修复范式研究[J]. 中国土地科学, 2020, 34(3): 1–8.
- [10] 高世昌. 国土空间生态修复的理论与方法[J]. 中国土地, 2018(12): 40–43.
- [11] HOBBS R J, NORTON D A. Towards a conceptual framework for restoration ecology[J]. Restoration Ecology, 1996, 4: 93–110.
- [12] MACE G M. Whose conservation?[J]. Science, 2014, 345(6204): 1558–1560.
- [13] ZEDLER J B. Coastal mitigation in southern California: the need for a regional restoration strategy[J]. Ecological Applications, 1996, 6(1): 84–93.
- [14] EHRENFELD J G. Defining the limits of restoration: the need for realistic goals[J]. Restoration Ecology, 2000, 8(1): 2–9.
- [15] ALLEN M F. The role of restoration ecology in ecosystem management: opportunities and responsibilities[C]//PETERSON D L, KLIMAS C V. The Role of Restoration in Ecosystem Management. Madison: Society for Ecological Restoration, 1996: 11–22.
- [16] HIGGS E, HARRIS J, MURPHY S, et al. On principles and standards in ecological restoration[J]. Restoration Ecology, 2018, 26(3): 399–403.
- [17] HOBBS R J. Restoration ecology's silver jubilee: innovation, debate, and creating a future for restoration ecology[J]. Restoration Ecology, 2018, 24(S1): S4–S32.
- [18] MCDONALD T, JONSON J, DIXON K W. National standards for the practice of ecological restoration in Australia [J]. Restoration Ecology, 2016, 24(5): 704.
- [19] STANTURF J A, PALIK B J, DUMROESE R K. Contemporary forest restoration: a review emphasizing function[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 331: 292–323.

- [20] BESTELMEYER B T. Threshold concepts and their use in rangeland management and restoration: the good, the bad, and the insidious[J]. *Restoration Ecology*, 2006, 14(3): 325 – 329.
- [21] HOBBS R J. Setting effective and realistic restoration goals: key directions for research[J]. *Restoration Ecology*, 2007, 15(2): 354 – 357.
- [22] RODRIGUES R R. High Diversity Forest Restoration in Degraded Areas: Methods and Projects in Brazil[M]. New York: Nova Science Publishers, 2007: 77 – 101.
- [23] SHACKELFORD N, HOBBS R J, BURGAR J M, et al. Primed for change: developing ecological restoration for the 21st Century[J]. *Restoration Ecology*, 2013, 21(3): 297 – 304.
- [24] PERRING M P, ERICKSON T E, BRANCALION P H. Rocketing restoration: enabling the upscaling of ecological restoration in the Anthropocene[J]. *Restoration Ecology*, 2018, 26(6): 1017 – 1023.
- [25] RODRIGUES R R, LIMA R A, GANDOLFI S, et al. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest[J]. *Biological Conservation*, 2009, 142(6): 1242 – 1251.
- [26] MCCONNACHIE M M, COWLING R M, VAN WILGEN B W, et al. Evaluating the cost-effectiveness of invasive alien plant clearing: a case study from South Africa[J]. *Biological Conservation*, 2012, 155: 128 – 135.
- [27] BENAYAS J M, NEWTON A C, DIAZ A, et al. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis[J]. *Science*, 2009, 325(5944): 1121 – 1124.
- [28] BULLOCK J M, ARONSON J, NEWTON A C, et al. Restoration of ecosystem services and biodiversity: conflicts and opportunities[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(10): 541 – 549.
- [29] WORTLEY L, HERO J M, HOWES M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature[J]. *Restoration Ecology*, 2013, 21(5): 537 – 543.
- [30] ARONSON J, BLIGNAUT J N, MILTON S J, et al. Are socioeconomic benefits of restoration adequately quantified? A meta-analysis of recent papers (2000–2008) in restoration ecology and 12 other scientific journals[J]. *Restoration Ecology*, 2010, 18(2): 143 – 154.
- [31] GOODWIN C N, HAWKINS C P, KERSHNER J L. Riparian restoration in the western United States: overview and perspective[J]. *Restoration Ecology*, 1997, 5: 4 – 14.
- [32] CORBIN J D, D'ANTONIO C M. Can carbon addition increase competitiveness of native grasses? A case study from California[J]. *Restoration Ecology*, 2004, 12(1): 36 – 43.
- [33] WANG C T, WANG G X, WANG Y, et al. Fire alters vegetation and soil microbial community in alpine meadow[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(5): 1379 – 1390.
- [34] 任海, 刘庆, 李凌浩, 等. 恢复生态学导论[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2019: 106 – 109.
- [35] 张绍良, 米家鑫, 侯湖平, 等. 矿山生态恢复研究进展——基于连续三届的世界生态恢复大会报告[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5611 – 5619.
- [36] PERRING M P, STANDISH R J, PRICE J N, et al. Advances in restoration ecology: rising to the challenges of the coming decades[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(8): 1 – 25.
- [37] MERRITT D J, DIXON K W. Restoration seedbanks—a matter of scale[J]. *Science*, 2011, 332(6028): 424 – 425.
- [38] MADSEN M D, DAVIES K W, WILLIAMS C J, et al. Agglomerating seeds to enhance native seedling emergence and growth[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49(2): 431 – 438.
- [39] GRINATH J B, INOUYE B D, UNDERWOOD N. Bears benefit plants via a cascade with both antagonistic and mutualistic interactions[J]. *Ecology Letters*, 2015, 18(2): 164 – 173.
- [40] LOMOV B, KEITH D A, HOCHULI D F. Pollination and plant reproductive success in restored urban landscapes dominated by a pervasive exotic pollinator[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(4): 232 – 239.
- [41] ZIMMERMAN N, IZARD J, KLATT C, et al. The unseen world: environmental microbial sequencing and identification methods for ecologists[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(4): 224 – 231.
- [42] JANUCHOWSKI-HARTLEY S R, MCINTYRE P B, DIEBEL M, et al. Restoring aquatic ecosystem connectivity requires expanding inventories of both dams and road crossings[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(4): 211 – 217.
- [43] SUDING K N. Toward an era of restoration in ecology: successes, failures, and opportunities ahead[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2011, 42: 465 – 487.
- [44] PALMER M A, BERNHARDT E S, ALLAN J D, et al.

- Standards for ecologically successful river restoration[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(2): 208 – 217.
- [45] NIELSEN-PINCUS M, MOSELEY C. The economic and employment impacts of forest and watershed restoration[J]. *Restoration Ecology*, 2013, 21(2): 207 – 214.
- [46] OLANDER L P, JOHNSTON R J, TALLIS H, et al. Benefit relevant indicators: ecosystem services measures that link ecological and social outcomes[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 1262 – 1272.
- [47] JANUCHOWSKI-HARTLEY S R, MOON K, STOECKL N, et al. Social factors and private benefits influence landholders' riverine restoration priorities in tropical Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 110: 20 – 26.
- [48] BERNHARDT E S, SUDDUTH E B, PALMER M A, et al. Restoring rivers one reach at a time: results from a survey of US river restoration practitioners[J]. *Restoration Ecology*, 2007, 15(3): 482 – 493.
- [49] ARONSON J, BRANCALION P H, DURIGAN G, et al. What role should government regulation play in ecological restoration? Ongoing debate in Sao Paulo State, Brazil[J]. *Restoration Ecology*, 2011, 19(6): 690 – 695.
- [50] MITCHELL M, LOCKWOOD M, MOORE S A, et al. Incorporating governance influences into social-ecological system models: a case study involving biodiversity conservation[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2014, 58(11): 1903 – 1922.
- [51] BUIZER M, RUTHROF K, MOORE S A, et al. A critical evaluation of interventions to progress transdisciplinary research[J]. *Society and Natural Resources*, 2015, 28: 670 – 681.
- [52] DE GROOT R S, BLIGNAUT J, DER PLOEG V S, et al. Benefits of investing in ecosystem restoration[J]. *Conservation Biology*, 2013, 27(6): 1286 – 1293.
- [53] BORGSTRÖM S, ZACHRISSON A, ECKERBERG K. Funding ecological restoration policy in practice—patterns of short-termism and regional biases[J]. *Land Use Policy*, 2016, 52: 439 – 453.
- [54] SUDING K, HIGGS E, PALMER M, et al. Committing to ecological restoration[J]. *Science*, 2015, 348(6235): 638 – 640.

Progress Review on International Research of Ecological Restoration

ZHANG Yaoyao¹, BAO Haijun², YU Zhenguo³

(1. Institute of Land and Urban-Rural Development, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China; 2. School of Public Administration, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China; 3. Chinese Academy of National Resources Economics, Beijing 101149, China)

Abstract: The purpose of this paper is to summarize the overarching progress and mainstream recognition of international research of ecological restoration, and to provide the references for capturing the leading edge of ecological restoration. The method of literature review is employed. The result shows that certain research progress has been made in object and scale, ecological and social-economic-cultural goals of ecological restoration, restoration technology of various ecosystems and factors, performance assessment dimensions and criteria of ecological restoration, based on the framework of “goal orientation—technical method—performance assessment”. However, in general, there is a lack of knowledge exchange among researchers, practitioners and policy makers, interdisciplinary research combining ecology, economics and sociology is not sufficient, and the research in the context of global climate change remains to be improved. In conclusion, the coupled research of theory, practice and policy, interdisciplinary research of ecology, sociology and economics, and the joint research between climate change and ecological restoration should be the overarching direction of ecological restoration in the future.

Key words: land ecology; ecological restoration; review; research prospects

(本文责编: 陈美景)