



DOI: 10.5846/stxb202006291672

李淑娟, 郑鑫, 隋玉正. 国内外生态修复效果评价研究进展. 生态学报, 2021, 41(10): 4240-4249.

国内外生态修复效果评价研究进展

李淑娟^{1,2}, 郑鑫¹, 隋玉正^{3,*}

1 中国海洋大学管理学院, 青岛 266000

2 中国海洋大学海洋发展研究院, 青岛 266000

3 青岛理工大学建筑与城乡规划学院, 青岛 266000

摘要:随着工业化和城镇化进程加快,生态系统退化、脆弱性提高等问题加剧,生态系统已无法通过自我调节恢复其结构和功能,生态修复成为修复脆弱生态系统的重要途径。生态修复效果是评价生态修复质量的关键环节,为生态修复决策制定和后续管理提供科学指导。基于 CiteSpace 计量分析软件梳理国内外生态修复效果研究文献共 4958 篇,初步判断生态修复效果评价的主要学科领域和研究热点。归纳总结国内外生态修复效果评价的主要内容,国内研究重点关注环境质量、生物资源、生态系统服务、效益及景观功能等方面,国外研究更重视生物资源、生态系统服务、感知价值和美学价值。据此,我国后续研究要加强同类型生态修复的系统研究、文化服务与其他服务的权衡与协同、生态与社会文化的综合效益评价、居民感知评价、多学科体系交叉研究等方面,更好地提升生态修复效果与生态空间品质。

关键词:生态问题;生态修复;多视角评价;生态修复效果

工业化和城镇化发展创造了巨额经济效益,同时牺牲了大量自然资源,导致植被破坏、湿地退化、水资源短缺等全球性生态问题频发^[1-2]。国内外采取一系列措施应对生态退化等问题,国际上,20 世纪 50—60 年代,欧洲、北美率先启动一系列生态工程以应对生态危机^[3]。2010 年,生物多样性公约缔约方大会在《2011—2020 年生物多样性战略计划》明确提出恢复至少 15% 的退化生态系统^[4]。在我国,生态修复已经上升为国家战略工程,成为实现生态文明建设的重要途径。2017 年 10 月,党的十九大明确提出“统一行使所有国土空间用途管制和生态保护修复职责”。2019 年 5 月,中共中央、国务院发布的《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》中指出,“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…推进生态系统保护和修复。”2020 年 5 月,国家发展改革委、自然资源部联合印发《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》,是从国家层面统筹山水林田湖草保护与修复的综合性规划。为解决生态系统退化及受损问题,满足人类急剧增长的高质量生态空间的现实需求,生态修复以优先恢复和重建受损生态系统为目标,采用自然或人工手段对受损生态系统进行恢复和重建^[5],综合考虑生态—社会—经济多重效益,为构建山水林田湖草命运共同体及提升人类福祉起到了积极推动作用。

生态修复指在帮助受损生态系统重建和改进的过程中,强调对生态系统的改良和全面改善,达到生态环境与人类社会和谐发展的效果^[6]。实践中,生态修复以修复生态系统结构和功能以及提升人类生态福祉为目标,聚焦社会—生态耦合系统,强调社会与生态的协同发展^[7-9]。然而鉴于生态、经济、社会等要素的复杂性和多样性,生态修复往往无法达到预期目标^[10]。生态修复效果评估作为判定生态修复工作有效性的重要

基金项目:国家社科基金重大项目(16ZDA049);中国海洋发展研究会项目(CAMAZD201908)

收稿日期:2020-06-29; 网络出版日期:2021-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suiyuzheng_qd@163.com

途径,为生态修复决策制定和生态系统管理提供决策依据。在人与自然和谐共生理念指导下,国内外学者围绕生态修复及其效果评价开展了大量理论与实践探索^[11-14],但已有研究多聚焦山水林田湖草某一具体生态系统或局地尺度的生态修复效果,缺乏对修复效果研究的系统归纳和梳理,对生态修复效果评价的研究现状及科学规律的整合研究较少。因此,本文借助 Citespace 文献计量分析软件,对国内外生态修复效果评价研究成果进行关键词共现分析,初步判断研究的热点和重点,系统梳理文献的研究内容并归纳总结当前研究进展,对我国生态修复效果评价研究进行展望,以期对生态修复的后续研究提供借鉴。

1 国内外生态修复效果评价研究概况

1.1 文献数据来源

国际上,通常将“生态修复”译为 ecological restoration、ecological rehabilitation、ecological remediation^[3,15-16],本文以 Web of Science(WOS)核心合集数据库为基础检索国外文献,将主题词限定为“ecological rehabilitation” OR “ecological remediation” OR “ecological restoration” 和 “effect *” OR “influence *” OR “result *” OR “impact *”,检索时间限定为 1985—2020 年(截至搜索日期 2020 年 8 月 17 日),初步检索文献 4689 篇。为确保分析的精确性,将语种限定为英文,文献类型为 Article,剔除不相关文献,最终精炼出 3993 篇。国内文献研究以中国知网(CNKI)数据库为基础,将主题词限定为“生态修复”并含“效果”,检索时间截至 2020 年 8 月 17 日,初步检索文献 1433 篇。进一步精炼检索范围,剔除不相关文献,最终筛选出文献 965 篇,其中包含核心期刊、CSSCI 来源期刊、CSCD 来源期刊的期刊文献 218 篇,硕士学位论文 600 篇,博士论文 147 篇。在文献年度分布上,国外研究始于 20 世纪 90 年代,国内于 2001 年出现相关研究,除个别年份外,国内外研究均呈现整体稳步增长态势,国内研究进度显著慢于国际水平(图 1)。

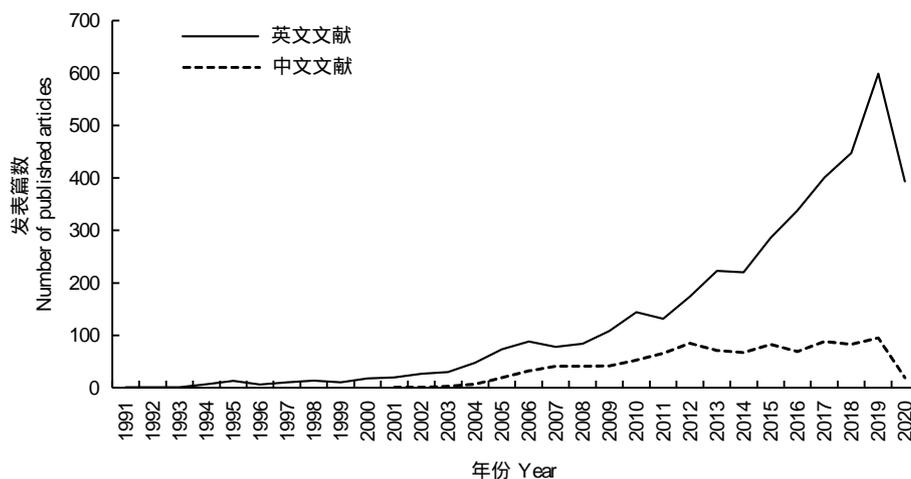


图 1 国内外生态修复效果相关文献数量年度分布

Fig.1 Annual distribution of domestic and foreign literature on ecological restoration effects

1.2 文献研究学科分类

基于国内外生态修复效果文献的检索结果,分别对国内外文献进行学科分类分析,国外文献借助 Citespace 中将节点类型设置为 Category,国内文献借助中国知网的“学科分类”功能,获得所选文献的学科分类并选取前十大热点学科,进一步了解国内外生态修复效果研究的主要学科领域(表 1)。国际上,研究涉及学科以环境科学、生态学为主,逐步拓展至林学、农学、工程学等学科领域,基于更加多元、细致的学科方向评价修复效果,全面提升修复效果的科学性和综合性。国内研究主要集中于环境科学(64.46%),在农业资源与环境、生态学、水利、林学等领域有一定关注。另外,近年来,随着我国高品质国土空间的转型,以及城市双修政策的出台,更加重视生态修复效果对人居生产、生活空间的影响,在城乡规划、城市经济领域开始显现,但相

关比重仍然较少。

表 1 国内外生态修复效果研究学科分布

Table 1 Major disciplines and their proportions of domestic and foreign literature on ecological restoration effects

国外文献 Foreign literature			国内文献 Domestic literature		
学科名称 Subjects	文献数量 Number of papers	占比/% Proportion	学科名称 Subjects	文献数量 Number of papers	占比/% Proportion
Ecology	1520	38.07	环境	622	64.46
Environmental Sciences	1449	36.29	农业资源与环境	59	6.11
Forestry	463	11.60	城乡规划与市政	53	5.49
Biodiversity & Conservation	402	10.07	生态	53	5.49
Engineering	360	9.02	生物	43	4.46
Agriculture	318	7.96	水利工程	35	3.63
Plant Sciences	317	7.94	城市经济	28	2.90
Water resources	299	7.49	林学	24	2.49
Engineering, Environmental	287	7.19	水产	17	1.76
Science & Technology-Other topics	268	6.71	矿业	16	1.66

文献“占比”计算中,分母为国外或国内文献总数。由于部分文章存在学科分类交叉,即一篇文章从属于多个学科分类,且本研究只选取前十大热点学科,故表格中占比之和不为 1

1.3 文献研究热点

关键词代表着文献研究的核心内容,高频关键词帮助初步把握该领域的研究热点^[17]。本文借助 Citespace 文献计量分析软件^[18-19]对国内外文献进行关键词共现分析,整理出国内外高频关键词及其中心性与首次出现年份(表 2,表 3)。其中,中心性是用来衡量节点在网络中重要性的指标^[19]。

表 2 1991—2019 年国外生态修复效果高频关键词

Table 2 High frequency key words in ecological restoration effects in foreign countries from 1991 to 2019

关键词 Keywords	词频 Frequency	中心性 Centrality	年份 Years	关键词 Keywords	词频 Frequency	中心性 Centrality	年份 Years
ecological restoration	1811	0.07	1995	China	202	0.02	2004
restoration	600	0.07	1995	loess plateau	175	0.01	2011
vegetation	462	0.01	1996	grassland	170	0.03	1999
biodiversity	461	0.05	1995	nitrogen	167	0.02	2004
conservation	431	0.05	1996	succession	151	0.02	2002
management	426	0.04	1999	landscape	149	0.01	2003
diversity	403	0.04	1996	establishment	148	0.02	2003
climate change	362	0.03	2006	disturbance	145	0.03	1997
impact	355	0.03	1996	water	139	0.01	2006
ecosystem service	314	0.01	2008	habitat	128	0.04	1995
forest	274	0.04	1996	fire	128	0.02	1996
growth	260	0.04	1995	response	128	0.02	2005
community	260	0.03	1999	regeneration	122	0.03	2003
ecosystem	258	0.04	1995	species richness	116	0.03	2000
dynamics	242	0.06	1996	model	115	0	2006
pattern	224	0.03	2002	carbon	114	0.01	2006
land use	219	0.02	2005	land	105	0.01	2006
plant	211	0.02	2004	climate	101	0.02	1999
soil	209	0.02	2004	revegetation	101	0.01	1995

国外生态修复效果研究中(表 2),出现频率最高的是生态修复(ecological restoration)、修复(restoration)、植被(vegetation)、生物多样性(biodiversity)、保护(conservation)、管理(management),此类关键词在相关文献中出现次数较多,初步判断为国外生态修复效果研究的热点领域。中心性较高的关键词包括生态修复(ecological restoration)、修复(restoration)、生物多样性(biodiversity)、保护(conservation)、管理(management)、影响(impact)、动态(dynamics),此类关键词多出现于 20 世纪 90 年代,在生态修复效果研究网络中重要性较高,与其他关键词关联度密切,同一时期的研究以此为中心,主要关注:(1)生态系统(ecosystem)或某类特定生态系统(vegetation、forest、water、habitat)的修复效果;(2)生态系统的后期保护(conservation)和管理(management)以维系修复效果;(3)生态修复过程中扰动(disturbance)对修复效果的影响。2000 年起,生态修复效果的研究更加多元化,重视人本主义特色,关注生态修复对社区(community)的影响。研究方法上关注模式(pattern)、景观格局(landscape)、模型(model)等。2005 年以后,气候变化(climate change)、生态系统服务(ecosystem services)、土地利用(land use)、中国(China)等关键词开始显现。

相对国外研究,国内生态修复效果研究起步较晚,研究热点分布较为松散(表 3)。其中,出现频率最高的是“生态修复”,且其中心性也居于首位。关键词“富营养化”、“重金属”出现次数和中心性较高,说明我国生态修复效果研究侧重于对环境质量改善程度的评价。研究对象重点关注土壤、水质和湿地等。修复技术与措施,涵盖生物修复、植物修复、水生植物、沉水植物、人工湿地、原位修复、水土保持等内容。随着对生态修复效果关注度的日益上升,效果评价、生态效应等生态修复后期导向的关键词逐渐增多。

表 3 2003—2019 年国内生态修复效果高频关键词

Table 3 High frequency keywords of ecological restoration effects in China from 2003 to 2019

关键词 Keywords	词频 Frequency	中心性 Centrality	年份 Years	关键词 Keywords	词频 Frequency	中心性 Centrality	年份 Years
生态修复	326	0.54	2001	净化能力	19	0	2001
富营养化	96	0.19	2001	效果评价	18	0.07	2009
水生植物	59	0.07	2001	植物修复	18	0.02	2004
人工湿地	35	0.1	2004	景观水体	13	0.02	2007
沉水植物	33	0.07	2006	水土保持	13	0	2003
重金属	22	0.05	2012	修复	12	0.02	2006
水质	21	0.05	2011	微生物	11	0.03	2006
生态浮床	20	0.03	2009	湿地	11	0.02	2010
植物群落	20	0.02	2001	生物修复	10	0.03	2007
ahp	20	0	2001	生态效应	10	0.03	2007
水质净化	19	0.04	2011				

2 国内生态修复效果评价研究进展

2.1 基于环境质量改善评价生态修复效果

长期以来,富营养化、重金属富集等对修复基底(土壤、水体等)质量造成严重威胁,生态修复有助于改善修复区域的水质、沉积物质量、土壤环境质量以及自然生境条件^[20],具体实践中,针对不同修复对象,我国学者通过对比其修复前后的属性特征、环境因子改善状况等评价修复效果。如水域修复中,霍元子等^[21]对比上海临港新城滴水湖生态修复前后水体水质指标、营养盐去除效果,测量沉水植被对富营养化水域环境质量改善情况。贺鸿志等^[22]采用人工浮床法,分析野生稻、香根草、风车草三种湿地植物对水体富营养化的修复效果。符文超等^[23]基于剑湖退化湿地生态修复后水体的氮磷、化学需氧量等含量去除率,结合修复后湿地景观格局变化,综合评价生态修复效果。矿区修复中,郝喆等^[24]基于修复前后土壤理化性质、肥力性质、重金属污染特征及植物生长指标评价尾矿库修复效果,结果显示随着时间增长,生态修复综合效果有所提高,栽种紫穗

槐样地对尾矿库的修复效果比沙棘地的修复效果好。田佳榕等^[25]基于植物群落生态学,对内蒙古某尾矿库生态修复区的植被修复效果进行调查分析,并探讨了不同环境梯度下适生植物种的选择及修复后的物种多样性变化与稳定性。土壤修复中,龚建华等^[26]研究了巨菌草对解决土壤重金属污染的修复效果,发现采用巨菌草修复的土壤重金属含量明显低于空白对照组,其中,As、Hg、Cd、Pb、Cr 含量比对照组分别下降 6.16%、4.75%、4.91%、2.77%、2.42%,说明巨菌草的重金属富集特性较好,对土壤修复效果较高。城市生态系统修复中,王敏等^[27]分析了城市河道的水质污染物和生物毒性去除率评价天津大沽河修复效果。总体而言,我国学者基于环境质量评价修复效果的研究较为丰富,评价对象涉及水域、湿地、土壤、城市生态系统等多方面。另外,通过对比不同修复技术与措施对环境质量的改善效果,来分析生态修复效果也是当前研究重点。

2.2 基于生物资源变化评价生态修复效果

生物资源是国家战略性资源,是人类生存和繁衍的物质基础^[28],部分学者针对修复地生物资源变化评价修复效果,涉及生物资源单项评价及其与其他指标的综合评价。单项评价重点关注生物资源的保护与修复,如祖国掌等^[29]以宿松县泊湖生态修复区为研究对象,根据生态修复前后研究区水体水生生物资源(含浮游生物、底栖动物和沉水植物)的变化评价修复效果。综合评价研究相对较为广泛,关注生态修复的整体性和综合性。如符小明等^[30]从生物资源、环境两方面构建海洋生态修复效果评价指标体系,二级指标为生物多样性、渔业资源结构、营养盐和水质指标,系统评价海州湾生态修复效果,结果显示生物资源与海洋环境的平均修复率分别为 17.96% 和 33.15%,即海州湾生态修复的环境改善效果优于生物资源恢复效果,在生物资源修复方面的实践有待加强。杨薇等^[31]针对我国黄河三角洲退化湿地,基于水量补给、沉积物理化性质变化、生物资源修复(含大型底栖生物和植被)三方面探析生态修复效果。杨金艳等^[32]针对淤积型海湾构建修复效果评价指标体系及相关模型,从空间规模、泥沙沉积、生物资源、景观、社会经济效益等方面对厦门湾海域修复工程的具体实施效果进行评价,结果显示修复效果综合评价指数为 84.2,即修复工程起到了较好的修复效果。生物资源是生态系统的基底要素,有助于提高生物多样性,促进生态系统稳定性,是我国生态修复效果研究的重点和热点。

2.3 基于生态系统服务评价生态修复效果

生态系统服务为量化自然生态系统对人类福祉的贡献提供综合视角,是联系自然和人文过程的重要桥梁^[33],为生态修复从时空尺度整合社会—经济—生态需求提供认知视角和决策途径^[13]。我国已有研究主要涉及生态系统服务综合评价,通过量化生态修复前后生态系统服务价值变化分析生态修复效果。张秋丰等^[34]基于生态系统服务功能构建生态修复效果评估指标体系,基于供给服务、调节服务、文化服务、支持服务四类服务共 15 项指标的价值量变化情况,对天津海岸带 1983—2016 年生态修复效果进行评估。潘叶等^[35]通过对比生态修复前后南京幕府山大气层、土壤层、植被层和枯落物层 4 个层次的生态系统服务价值量,分析幕府山采矿场 10 期生态修复工程实施后的修复效果。刘培斌等^[36]从水安全、生态安全和文化遗产三方面提出永定河生态修复目标,以 2015 年和 2030 年为时间节点,基于生态系统服务价值预测永定河生态修复的预期效果。邵全琴等^[11]综合生态系统服务、结构及质量变化的动态过程,构建生态修复成效评估指标体系,对三江源生态保护和建设一期工程展开生态修复效果评估。随着我国山水林田湖草生命共同体理念的全面推进,协同生态服务与社会文化服务以增进生态修复效果是未来发展的趋势。

2.4 基于效益角度评价生态修复效果

基于效益视角评价生态修复效果,主要包括单项评价和综合评价两方面。评价指标涉及生态环境、资源、社会、经济等方面,学者分别对单维、双维及多维价值展开讨论。单维和双维价值评价生态修复效果研究更加细致深入,如郎亮明等^[12]采用结构方程模型,基于农户视角探析陕北地区 3 个典型县生态修复工程的社会经济效益,进而评价生态修复效果。潘叶等^[37]采用多目标分析法构建矿山废弃地生态修复效益评价指标体系,评价 1999—2008 年南京幕府山生态修复带来的生态环境效益。多维价值评价中,如朱晓博^[38]基于“环境效应—价值效益”评价城市河流的生态修复效果,环境效应主要涉及河流自然及健康性指标,价值效益涉及景

观、游憩、经济等多方面要素。庄小静^[39]以矿业废弃地——紫金山国家矿山废弃地向绿色空间(矿山公园)的修复转型为出发点,基于社会、经济、生态环境三方面对其修复效果进行综合评价,结果显示生态修复对生态和社会效益影响显著,而经济效益会制约综合效益的发展。由于多维价值评价更关注生态修复为生态系统与人类社会系统带来的综合效益,逐渐成为我国生态修复效果研究的主流。

2.5 基于景观功能评价景观生态修复效果

工业化和城市化发展造成生态环境退化,导致废弃河道、工业废弃地、采煤塌陷地等一系列具有消极印记的景观不断涌现,对居民生产生活造成了严重影响^[40-41]。为改善破损的生态环境,同时为居民创造高质量的生活空间,景观生态学导向下的生态修复成为早期受损景观治理的重要途径^[42],属于我国早期的生态修复实践。此类生态修复难度大、投资成本高^[41],为探究修复工程的实际成效,部分学者对其生态修复效果展开研究。刘向阳^[43]从河流形态结构、水体环境功能、资源再生与循环利用水平、人本体系、智能监测五大方面 43 个指标出发,对北京永定河门城湖生态景观修复效果进行评价,评价结果显示整体修复效果较好,生态、水文化、休闲游憩等复合价值有所提升。王江萍等^[44]以河南新乡凤泉区某处白垩土矿业废弃地为研究对象,基于大气、土壤、地形、水、植被等生态环境指标,分析其 2002—2012 年生态环境治理与景观生态重建工程的综合修复效果。韩冬^[45]根据生态环境、游憩体验、观赏价值、科普价值、社会效益五方面建立指标体系,综合评价杭州天子岭垃圾填埋场修复为景观生态公园的实际效果。基于景观功能方面的景观生态修复效果评价研究成果较少,已有研究通常综合考虑生态修复的生态及社会文化价值,仍然是我国未来研究的重点。

3 国外生态修复效果评价研究进展

3.1 基于生物资源修复的生态修复效果评价

资源的恢复是衡量修复地生态修复效果的关键标准,国外研究多基于全国乃至全球的生态修复工程,通过分析宏观尺度下生态修复对生物资源、生物多样性恢复力的影响来评价修复效果。生物多样性有助于维系生态系统稳定,提升服务功能^[46],因此,已有研究通常根据评价生物多样性的维持功能来分析生态修复效果。Benayas 等^[47]对全球范围内 89 个不同类型生态系统进行研究,采用 Meta 分析测评生态修复效果,发现修复帮助提升了 44% 的生物多样性。Hernández 等^[14]探究了 1768 个横跨美国大西洋和海湾沿岸的牡蛎礁生态修复项目的实施效果,结果显示整体修复效果不显著,修复工程仅帮助重建了修复地 4.5% 的珊瑚礁区域。Huang 等^[48]整合了中国 103 篇已发表陆地生态修复相关研究中的 2099 个数据集,采用 Meta 分析探究生态修复对修复地生物多样性的影响,发现生态修复对维管植物、土壤微生物和土壤无脊椎动物的恢复率分别为 30%、73% 和 48%。

3.2 基于生态系统服务的生态修复效果评价

生态系统服务是指生态系统所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[49],量化生态系统服务价值可以为生态修复效果评价提供科学依据。生态系统服务评估主要涉及单项评估和综合评估。在生态修复效果评价过程中,单项评估重点关注生态修复对生物多样性保护^[14,47,50]、土壤保持^[51]、气候调节^[52]等功能的改善效果。近年来,生态修复对生态系统文化服务价值的影响逐渐受到关注^[53-54]。综合评估涉及自然、经济、社会文化服务等多维价值,Eric 等^[55]分析了多瑙河三角洲 1960 年到 1989 年经济发展期以及 1990 年到 2010 年生态修复期间引起的湿地生态系统服务变化,从粮食生产、旅游和游憩、科学教育、生物多样性保护等方面共 13 项指标评估多瑙河三角洲生态系统服务价值,结果显示三角洲三分之二的生态系统服务功能已退化,且由于三角洲湿地受损严重,目前,生态修复尚未完全扭转生态系统服务下降的趋势。Elmqvist 等^[56]以涵盖美国、加拿大、中国等多个国家中的 25 个城市为研究对象,基于生态系统服务综合效益评估各区域的生态修复效果,结果显示生态修复有助于提高区域生态、社会、经济多重效益。另外,修复过程中充分考虑多类服务的权衡与协同^[57],可以提高生态环境管理效率^[58],增进生态服务与人类福祉的协同,提升生态修复效果评价的综合性、全面性和准确性。

3.3 基于美学价值的生态修复效果评价

20 世纪 60 年代兴起的大地艺术思想提倡突破传统的美学价值观,将受损景观要素(工业废弃地、废弃矿区等)视作一种资源,在此基础上进行合理的改造和美化^[59],如富有工业特色的美国西雅图煤气厂公园就是这一时期的产物,对原有工业遗迹进行生态修复,生态功能修复的同时兼具文化传承功能。20 世纪 90 年代, Eric^[60] 提出尊重美学原则能提高生态修复中公众的认同感和接受度。随后, Hands 等^[61] 基于视觉偏好视角评价研究区生态修复效果,发现诸如鸟窝、岩石等乡土元素以及场地内元素色彩的多样性和数量从不同程度上影响美学价值,提出了改善生态修复效果的具体方案。类似地, Junker 等^[62]、Raffaele 等^[63] 基于公众审美偏好评价生态修复效果。Ashlee 等^[64] 在河流生态修复中,定量评估了生态价值、形态价值和美学价值之间的关系,综合各类价值以评价整体生态修复效果。Saha 等^[65] 以印度东部杜伦河为研究对象,评估与调查了沿岸河道的生态品质与居民对河道景色的审美偏好,发现研究区 52% 的区域退化严重,且对于公众而言,更具吸引力往往是那些生态质量较高的区域,据此提出应建立适应当地居民审美偏好的生态修复框架,对于维系修复后期生态效益和景观管理具有重要意义。从美学视角出发评价生态修复效果,多融合修复地地域文化特色,关注局地尺度生态景观结构的设计及管理,是生态修复在改善人地关系研究的具体体现。

3.4 基于公众感知的生态修复效果评价

国外研究重视人本主义特色,关注公众对生态修复的感知价值,进而探讨生态修复效果在提升人类福祉方面的作用机理。Ulrika 等^[66] 详细对比公众在生态修复前期、中期、后期的感知以评估河流生态修复效果,探究生态修复与人类福祉的关系。Feng 等^[67] 研究发现部分生态保护工程在实践中会对居民生活造成负面影响,证实了从居民感知视角探析生态修复效果的必要性,并探究中国北部河流生态修复工程对原生居民生计的影响评价修复效果。居民是生态修复工程的利益相关者,充分考虑感知价值的生态修复效果评价,也为生态修复相关政策制定和改进^[68-69] 提供科学依据。居民对修复地的感知价值与修复地生态、文化等要素密切相关,如 Buijs^[70] 以文化价值、自然价值和乡土价值为框架,根据荷兰漫滩地区居民对修复后生态环境的态度和感知价值评价生态修复效果。Emma 等^[71] 从人地关系角度切入,调查了英国北部迪恩河流(River Dearne)生态修复实施 14 年后当地居民的感知价值变化,探析影响居民感知的生态及人文景观因素,提出文化价值研究框架和理想化知觉研究框架,为基于感知价值的生态修复效果评价提供参考。居民对生态修复效果的感知及偏好有利于增进社会效益,以感知价值为核心评价生态修复效果评价是国外研究的重点内容。

4 研究评述与展望

4.1 国内外研究评述

(1) 国内基于环境质量评价生态修复效果研究成果丰富,评价方法及指标体系有待完善。国内研究多从环境质量改善的角度出发,基于具体修复地衡量生态修复效果,但不同修复对象的环境评价指标、测量方法等仍然缺乏标准和规范,尚未形成统一的评价标准,对生态修复实践的指导作用有限。缺乏对同类型生态系统、同一区域生态修复效果评价的规律总结,仍需在未来的研究中进一步完善。

(2) 生态系统服务评价是国内外研究热点,文化服务价值评价亟需深入。当前,国内外基于生态系统服务评价生态修复效果的研究已取得一定进展,但国内研究仍存在研究总量不足、文化服务重视不够等现实问题。文化服务涵盖娱乐休闲、美学欣赏等多功能价值,有助于增进居民对修复后生态空间的认同感和满意度,对于提升修复地质量、增进居民福祉具有重要意义,未来生态修复效果评估中应深入推进文化服务价值评价,文化服务的指标选取、量化方式选择等仍是需要解决的突出问题。

(3) 基于综合效益评价生态修复效果是发展趋势,因地制宜构建指标体系成为研究重点。国内生态修复效果研究重视生态—社会—经济等多方面效益协同,已有研究从单一效益评估逐步发展至多维效益评估,综合效益评估成为探索人与自然协同目标下生态修复效果评价的重要手段。未来研究中,考虑到修复地类型复杂多样,生态环境、地域和文化特色各异,构建契合实际的综合评价指标体系是研究重点。

(4)景观规划设计是我国早期的生态修复实践,后期修复效果评估有待加强。景观修复综合生态环境恢复与人居环境改善,我国学者通常基于生态价值、社会文化价值等构建生态修复效果评价指标体系,但已有研究成果在居民对修复后空间的感知价值、美学价值方面结合深度不够,对生态修复的社会效益研究较薄弱,高成本投入下的修复质量如何、是否为居民带来切实效益等关键问题仍需进一步探索。

(5)从居民感知视角评价生态修复效果是国外生态修复效果研究的重点内容,居民作为生态修复工程的重要利益相关者,对居民福祉的影响是生态修复效果评估的重要组成部分,具体反映在生态修复效果的社会效益方面。局地尺度的生态修复工程中,美学价值、地域文化特色等要素是影响居民感知价值的关键,而在宏观尺度中,生态修复在气候调节、生境改善等各方面影响居民感知,因此,基于居民感知价值评价生态修复效果有其必要性。鉴于感知价值本身的复杂性和动态性,居民对修复效果感知存在主观差异性,感知价值的量化评估成为研究难点,构建科学的评价指标体系、选择适宜的研究方法等还需要深入研究和实践。

4.2 对我国未来生态修复效果评价的启示

基于以上生态修复效果评价的研究现状,我国未来生态修复效果研究应重视以下几个方面:

(1)增加同类型生态修复效果评价的系统研究

目前,我国基于环境质量评价生态修复效果的研究成果丰富,由于生态修复效果的评估没有固定的参照标准,已有研究多基于具体修复地生态和环境资源受损现状,根据生态系统类型及修复目标选择评价指标及方法,缺乏对同类生态系统修复效果的经验总结,影响修复工程的效益和效率的提升。因此,增加对相似地域中同类生态系统修复效果评价的系统分析,探寻相似环境、文化、社会经济体系中生态修复效果的差异和规律,有助于节约成本,为修复工程的设计和管理提供经验,促进修复工程的优化和改良。

(2)重视文化服务与其他生态系统服务的权衡与协同研究

生态系统服务是联系自然生态系统与人类社会系统的纽带,直接影响人类福祉,我国未来研究应加强生态系统文化服务导向下的生态修复效果评价研究,特别是注重文化服务与其他服务的权衡与协同,社会文化服务关乎居民生活质量,是生态修复与城乡品质提升的重要组成部分,有助于促进生态修复的生态价值与社会文化价值融合,综合提升生态修复效果。

(3)加强生态与社会文化协同的综合效益评价研究

在我国,基于综合效益视角评价生态修复效果的研究尚处于初始阶段,后续研究应杜绝“一刀切”的评价模式,探索符合区域实际的综合效益评价指标,重视地域文化特色与修复后生态空间融合、人地关系协调等方面,注重生态修复对居民福祉的影响,把握生态效益与社会经济效益的权衡与协同,确保生态修复效果评价结果的科学和准确。

(4)围绕居民福祉评价生态修复效果

目前,我国生态修复效果评价研究重点集中在环境、生态系统与效益层面,居民感知价值仍未受到重视,可供居民休闲的生态空间不足等问题依然突出,未来研究可借鉴国外在提升居民福祉方面的生态修复效果评价经验,结合我国国情与修复地地域特色,加强生态空间与人居空间的耦合机制研究,重视社会经济导向下生态修复效果的综合提升,技术层面,要集中解决评估指标体系与量化评估方法的研究,为生态修复政策制定和实施提供科学依据。

(5)加强多学科体系交叉研究

生态修复效果研究集成多学科研究理论,具体涉及生态学、环境科学、工程学、地理学等领域。已有研究多侧重基于环境科学、生态学等评价修复效果,基于人文地理学、景观生态学等视域的研究不足。多学科交叉评价生态修复效果仍然处于起步阶段,融合多学科理论制定生态修复政策和适应性研究框架,深化多学科理论和方法系统,有助于优化生态修复效果评估体系,提升生态修复的科学性和综合性。

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰,田汉勤,陶福祿,赵文武,王帅. 全球变化对生态系统服务的影响. 中国基础科学, 2017, 19(6): 14-18.

- [2] Katharina A, Werner R, Dominik T, Rupert S. Trade-offs between temporal stability and level of forest ecosystem services provisioning under climate change. *Ecological Applications*, 2018, 28(7): 1884-1896.
- [3] 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.
- [4] United Nations. *Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations, 2015.
- [5] 易行, 白彩全, 梁龙武, 赵子聪, 宋伟轩, 张妍. 国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 37-52.
- [6] 邬晓燕. *中国道路 中国生态修复的进展与前景*. 北京: 经济科学出版社, 2017.
- [7] 程健华. 基于生态系统服务的城市海岸带生态修复效果评估研究——以厦门五缘湾为例[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2010.
- [8] 彭建, 李冰, 董建权, 刘焱序, 吕丹娜, 杜悦悦, 罗明, 吴健生. 论国土空间生态修复基本逻辑. *中国土地科学*, 2020, 34(5): 18-26.
- [9] 吴鹏. 论生态修复的基本内涵及其制度完善. *东北大学学报: 社会科学版*, 2016, 18(6): 628-632.
- [10] Hopfensperger K N, Engelhardt K A M, Seagle S W. Ecological feasibility studies in restoration decision making. *Environmental Management*, 2007, 39(6): 843-852.
- [11] 邵全琴, 樊建文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. *地理学报*, 2016, 71(1): 3-20.
- [12] 郎亮明, 徐涛, 刘国彬, 赵敏娟. 农户生态修复行为与修复效果间的互馈效应研究——基于陕北地区调查数据的实证分析. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(6): 57-63.
- [13] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 刘焱序, 刘前媛, 李冰. 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. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 3-13.
- [14] Hernández A B, Brumbaugh R D, Frederick P, Grizzle R, Luckenbach M W, Peterson C H, Angelini C. Restoring the eastern oyster: how much progress has been made in 53 years?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2018, 16(8): 463-471.
- [15] 孟伟庆, 李洪远. 再议 Ecological Restoration 一词的中文翻译与内涵. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2824-2830.
- [16] 付战勇, 马一丁, 罗明, 陆兆华. 生态保护与修复理论和技术国外研究进展. *生态学报*, 2019, 39(23): 9008-9021.
- [17] 肖练练, 钟林生, 周睿, 虞虎. 近 30 年来国外国家公园研究进展与启示. *地理科学进展*, 2017, 36(2): 244-255.
- [18] Chen C M. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359-377.
- [19] 李杰. CiteSpace 中文指南. (2017-07-19). <http://blog.sciencenet.cn/blog-554179-1066981.html>.
- [20] Cals M J R, Postma R, Buijse A D, Martejn E C L. Habitat restoration along the River Rhine in the Netherlands: putting ideas into practice. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 2010, 8(1): 61-70.
- [21] 霍元子, 何文辉, 罗坤, 王阳阳, 张饮江, 田千桃, 何培民. 大型藻引导的沉水植被生态修复对滴水湖水质的净化效果. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 495-499.
- [22] 贺鸿志, 余景, 李拥军, 黎华寿. 3 种湿地植物构建的浮床系统修复富营养化水体的效果研究. *华南农业大学学报*, 2011, 32(2): 16-20.
- [23] 符文超, 田昆, 肖德荣, 李伟, 岳海涛, 赵湘江, 杨浩. 滇西北高原入湖河口退化湿地生态修复效益分析. *生态学报*, 2014, 34(9): 2187-2194.
- [24] 郝喆, 曹明杰, 杨青潮. 尾矿库生态退化区修复效果评价. *矿业研究与开发*, 2019, 39(10): 143-147.
- [25] 田佳榕, 马伟波, 戚旭东, 许素, 徐雁南, 李海东. 内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4): 601-608.
- [26] 龚建华, 薛合伦, 康敏, 毛莎莎, 邓雅文. 巨菌草的重金属富集特性及对土壤的修复效果. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2019, 45(2): 154-161.
- [27] 王敏, 唐景春, 朱文英, 梁霍燕, 王如刚. 大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响. *生态学报*, 2012, 32(14): 4535-4543.
- [28] 梁卓, 褚鑫, 曾艳, 周桔, 马俊才. 我国战略生物资源大数据及应用. *中国科学院院刊*, 2019, 34(12): 1399-1405.
- [29] 祖国掌, 鲍传和, 胡建华, 荣朝振, 刘鑫, 段荣会, 王欣欣, 王磊, 刘全美, 程必胜, 刘天文. 宿松县泊湖生态修复区水生生物资源演变情况调查研究. *安徽农业大学学报*, 2012, 39(3): 327-335.
- [30] 符小明, 唐建业, 吴卫强, 张硕. 海州湾生态修复效果评价. *大连海洋大学学报*, 2017, 32(1): 93-98.
- [31] 杨薇, 裴俊, 李晓晓, 孙涛, 王文燕. 黄河三角洲退化湿地生态修复效果的系统评估及对策. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 54(1): 98-103.
- [32] 杨金艳, 罗福生, 王爱军, 于东生. 淤积型海湾整治修复效果综合评价——以厦门湾为例. *应用海洋学报*, 2020, 39(3): 389-399.
- [33] 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.
- [34] 张秋丰, 白洁, 马玉艳, 高文胜, 屠建波. 天津海岸带生态修复效果评估方法研究. *海洋环境科学*, 2019, 38(5): 782-789, 795.
- [35] 潘叶, 王腊春, 张燕. 基于生态价值的幕府山采矿废弃地修复效果评估. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 180-186.
- [36] 刘培斌, 沈来新, 刘俊国, 高晓薇, 王国青. 基于生态服务价值的永定河(北京段)生态修复效果评价. *水利水电技术*, 2016, 47(4): 9-13.
- [37] 潘叶, 张燕. 矿山废弃地生态修复效益评价研究——以南京幕府山为例. *中国水土保持*, 2016, (5): 61-65.
- [38] 朱晓博. 城市河流生态修复效果评价——以北京市永定河为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [39] 庄小静. 矿业废弃地再利用为绿色空间综合效益评价——以福建紫金山国家矿山公园为例[D]. 福州: 福建师范大学, 2017.
- [40] 常江, Theo K. 从采矿迹地到景观公园. *煤炭学报*, 2005, 30(3): 399-402.
- [41] 关军洪, 郝培尧, 董丽, 李雄. 矿山废弃地生态修复研究进展. *生态科学*, 2017, 36(2): 193-200.
- [42] 毕慧娟. 工矿废弃地的生态修复与景观设计——评《煤矿废弃地生态植被恢复与高效利用》. *矿业研究与开发*, 2020, 40(4): 173-174.

- [43] 刘向阳. 永定河门城湖河道生态景观治理模式及效果评价[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [44] 王江萍, 张毅川. 从废弃地到优质地: 城郊白垩土矿业废弃地的生态恢复与景观重建. *中国园林*, 2015, 31(4): 20-24.
- [45] 韩冬. 垃圾填埋场再生景观评价研究——以杭州市天子岭生态公园为例[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [46] Sasaki T, Furukawa T, Iwasaki Y, Seto M, Mori A S. Perspectives for ecosystem management based on ecosystem resilience and ecological thresholds against multiple and stochastic disturbances. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 395-408.
- [47] Rey Benayas J M, Newton A C, Diaz A, Bullock J M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, 2009, 325(5944): 1121-1124.
- [48] Huang C B, Zhou Z X, Peng C H, Teng M J, Wang P C. How is biodiversity changing in response to ecological restoration in terrestrial ecosystems? A meta-analysis in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1-9.
- [49] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997: 220-221.
- [50] Meli P, Rey Benayas J M, Balvanera P, Ramos M M. Restoration enhances wetland biodiversity and ecosystem service supply, but results are context-dependent: a meta-analysis. *PLoS One*, 2014, 9(4): e93507.
- [51] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [52] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2014, 3: 2846.
- [53] Rosa J C S, Geneletti D, Morrison-Saunders A, Sánchez L E, Hughes M. To what extent can mine rehabilitation restore recreational use of forest land? Learning from 50 years of practice in southwest Australia. *Land Use Policy*, 2020, 90: 104290.
- [54] Constant N L, Taylor P J. Restoring the forest revives our culture: ecosystem services and values for ecological restoration across the rural-urban nexus in South Africa. *Forest Policy and Economics*, 2020, 118: 102222.
- [55] Gómez-Baggethun E, Tudor M, Doroftei M, Covaliov S, Năstase A, Onăra D F, Mierlă M, Marinov M, Doroencu A C, Lupu G, Teodorof L, Tudor I M, Köhler B, Museth J, Aronsen E, Johnsen S I, Ibram O, Marin E, Crăciun A, Cioacă E. Changes in ecosystem services from wetland loss and restoration: an ecosystem assessment of the Danube Delta (1960-2010). *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100965.
- [56] Elmqvist T, Setälä H, Handel S N, van der Ploeg S, Aronson J, Bliognaut J N, Gómez-Baggethun E, Nowak D J, Kronenberg J, de Groot R. Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 14: 101-108.
- [57] Yepsen M, Baldwin A H, Whigham D F, McFarland E, LaForgia M, Lang M. Agricultural wetland restorations on the USA Atlantic Coastal Plain achieve diverse native wetland plant communities but differ from natural wetlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 11-20.
- [58] Guillem E E, Murray-Rust D, Robinson D T, Barnes A, Rounsevell M D A. Modelling farmer decision-making to anticipate tradeoffs between provisioning ecosystem services and biodiversity. *Agricultural Systems*, 2015, 137: 12-23.
- [59] 冯娜. 废弃矿山的景观重置. *平顶山工学院学报*, 2005, 14(6): 1-4.
- [60] Higgs E S. What is good ecological restoration?. *Conservation Biology*, 1997, 11(2): 338-348.
- [61] Hands D E, Brown R D. Enhancing visual preference of ecological rehabilitation sites. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58(1): 57-70.
- [62] Junker B, Buchecker M. Aesthetic preferences versus ecological objectives in river restorations. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 85(3/4): 141-154.
- [63] Laforteza R, Corry R C, Sanesi G, Brown R D. Visual preference and ecological assessments for designed alternative brownfield rehabilitations. *Journal of Environmental Management*, 2008, 89(3): 257-269.
- [64] McCormick A, Fisher K, Brierley G. Quantitative assessment of the relationships among ecological, morphological and aesthetic values in a river rehabilitation initiative. *Journal of Environmental Management*, 2015, 153: 60-67.
- [65] Saha D, Das D, Dasgupta R, Patel P P. Application of ecological and aesthetic parameters for riparian quality assessment of a small tropical river in eastern India. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106627.
- [66] Åberg E U, Tapsell S. Revisiting the River Skerme: the long-term social benefits of river rehabilitation. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 113: 94-103.
- [67] Feng Q, Miao Z, Li Z X, Li J G, Si J H, Su Y H, Chang Z Q. Public perception of an ecological rehabilitation project in inland river basins in northern China: success or failure. *Environmental Research*, 2015, 139: 20-30.
- [68] Greiner R, Gregg D. Farmers' intrinsic motivations, barriers to the adoption of conservation practices and effectiveness of policy instruments: empirical evidence from northern Australia. *Land Use Policy*, 2011, 28(1): 257-265.
- [69] Deng J, Hao W H, Zhang W, Han X H, Li K Y, Feng Y Z, Yang G H. Exploring farmers' pro-ecological intentions after ecological rehabilitation in a fragile environment area: a structural equation modeling approach. *Sustainability*, 2018, 10(1): 29.
- [70] Buijs A E. Public support for river restoration. A mixed-method study into local residents' support for and framing of river management and ecological restoration in the Dutch floodplains. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2680-2689.
- [71] Westling E L, SurrIDGE B W J, Sharp L, Lerner D N. Making sense of landscape change: long-term perceptions among local residents following river restoration. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 2613-2623.