

DOI: 10.20103/j.stxb.202211103240

陈妍,周妍,包岩峰,周旭,苏香燕.山水林田湖草沙一体化保护和修复工程综合成效评估技术框架.生态学报,2023,43(21):8894-8902.

Chen Y, Zhou Y, Bao Y F, Zhou Xu, Su X Y. A technical framework for effectiveness evaluation of holistically ecological conservation and restoration project of mountains, rivers, forests, farmlands, grasslands, and deserts. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8894-8902.

山水林田湖草沙一体化保护和修复工程综合成效评估技术框架

陈 妍,周 妍*,包岩峰,周 旭,苏香燕

自然资源部国土整治中心, 北京 100035

摘要:我国实施了诸多生态保护修复工程,取得了显著成效。然而,以往工程多以湿地、森林、草原等单一类型的生态系统为保护修复目标,缺乏区域整体性、系统性考虑。2016 年以来,我国开始从完整流域的视角出发,系统考虑生态系统完整性、自然地理单元连续性和社会经济可持续性,实施山水林田湖草沙一体化保护和修复工程。该类工程保护修复目标多样、内容庞杂,因而成效评估面临子项目类型多、空间尺度多、目标维度多、项目实施周期短等诸多挑战。就空间尺度而言,评估对象既要涵盖常规评估中相对较大的、确定的空间范围,也要涵盖具有相对类似生态问题或目标的保护修复单元,以及实际采取措施的子项目;就时间尺度而言,既要考虑工程实施结束时的成效,也要考虑实施结束后的成效动态;就评估内容而言,既要关注社会、生态、经济效益,也要考察工程措施与生态效应之间的关系、不同类型子项目的关联性与协同性、工程的整体性与系统性。研究基于上述背景制定了一个新型评估框架,重点强调基于子项目、保护修复单元以及工程范围三个尺度的指标体系,以及生态、社会、经济、管理四个方面的评估内容。新的评估框架将有助于完善山水林田湖草沙一体化保护和修复工程标准体系,为推进国土空间整体保护、系统修复、综合治理提供技术支撑。

关键词:生态修复; 山水林田湖草沙; 成效评估; 管理

A technical framework for effectiveness evaluation of holistically ecological conservation and restoration project of mountains, rivers, forests, farmlands, grasslands, and deserts

CHEN Yan, ZHOU Yan*, BAO Yanfeng, ZHOU Xu, SU Xiangyan

Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

Abstract: In the last decades, many ecological conservation and restoration projects have been carried out and significant achievements have been made in China. However, many of these projects took the single element and single type of ecosystem, such as wetlands, forests, and grasslands etc. as the conservation and restoration object, lacking the overall and systematic consideration at regional scale. From the perspective of a complete watershed, holistically ecological conservation and restoration projects of mountains, rivers, forests, farmlands, grasslands, and deserts have been launched out at landscape scale since 2016, based on the concept that *mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands are a community of life*. For these projects, the integrity of the ecosystem, the continuity of the physical geography unit and the socio-economic sustainability were systematically considered. These projects contained relatively complex goals and tasks of conservation and restoration. Thus, the following challenges e.g. multiple sub-project types, multiple spatial scales,

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3204003\03);国家重点研发计划项目(2022YFF1303205);2019 年度自然资源部高层次科技创新人才培养工程杰出青年人才资助项目(12110600000018003931)

收稿日期:2022-11-10; **网络出版日期:**2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuyan053991@163.com

multiple targets, and short implementation period etc., might be faced in effectiveness evaluation. As for the spatial scale, the targets of evaluation should cover both relatively large and certain range of space, which have always been set in conventional evaluation, as well as conservation and restoration unit (the ecosystems generally face the similar problem and share similar objectives) and sub-project (the specific conservation and restoration measures are taken). As for the temporal scale, both the effectiveness at the end of project implementation and the effectiveness dynamics after the end of implementation should be taken into consideration. As for the content of evaluation, it should not only focus on the social, ecological, and economic benefits, but also investigate the relationship between the engineering measures and ecological effects, the correlation and synergy of different types of sub-projects, and the integrity and systematization of the project. Based on the above background, a novel evaluation framework was built in the current study, as the traditional evaluation could not meet the technical and management requirements. In this framework, the index system based on three scales (sub-project, conservation and restoration unit, and scope of project) and the evaluation content including four aspects (ecological, social and economic benefits and management effects), were emphasized. The novel framework would help improve the standard system of holistically ecological conservation and restoration project of mountains, rivers, forests, farmlands, grasslands, and deserts, and provide technical support for promoting the overall conservation, systematic restoration, and comprehensive management of territorial space in China.

Key Words: ecological restoration; mountains, rivers, forests, farmlands, grasslands and deserts; effectiveness evaluation; management

我国生态保护修复工作历经数十载,20 世纪 50 年代起就开始探索自然保护地形式的生态保护措施,70 年代以后陆续实施了三北防护林体系建设、北方草原沙化防治、退耕还林、重点流域水土流失治理、西南喀斯特地区石漠化治理、京津风沙源治理、长江流域防护林体系建设工程、珠江流域防护林体系工程、退牧还草工程、三江源生态保护和建设等一系列生态工程。在取得显著成效的同时,我们需要认识到上述生态保护修复工作多以湿地、森林、草原等单一类型生态系统为目标,缺乏区域整体性、系统性考虑。2016 年以来,我国开始从完整流域的视角出发,系统考虑生态系统的完整性、自然地理单元的连续性和社会经济的可持续性,实施山水林田湖草沙一体化保护和修复工程。为考察该类工程是否体现了整体性、系统性、科学性特点,并取得了预期成效,对已有工程开展综合成效评估工作尤为必要,其不仅是工程全流程管理的重要组成部分,同时也为措施调整优化提供了基本依据。

生态修复成效相关研究始于 20 世纪 90 年代。我国早期的相关研究主要关注水土保持治理效果和做法经验总结,评估内容多为植被盖度变化以及修复带来的人居生活改善与收入提升^[1-4]。河流湖泊方面的研究侧重于环境修复,评估内容以水质改善情况为主^[5],随后水生态内容也逐步纳入其中^[6]。近年来,随着国家级生态修复工程的实施,评估尺度逐步扩大,评估内容更为宏观。例如,陈曦等^[7],何兴原等^[8],刘国彬等^[9]分别评估了塔里木河综合治理工程、三江平原湿地保护工程、黄土高原生态工程的综合成效。邵全琴等^[10]以目标为导向,用《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》涉及的关键指标评估三江源一期工程生态效益。国外文献报道的研究对象更为广泛,评估对象涉及陆地生态系统和海岸带修复等各类工程^[11-20]。总体而言,已有研究重点以生物资源、生态系统服务为主,强调环境质量、功能与效益,在此基础上国外研究还注重管理成效^[21]。

传统的生态评估方法大多针对特定生态要素,解决景观尺度的一体化保护和修复成效评估问题可能具有一定局限性。为此,本研究在梳理总结已有评估方法的基础上,结合管理需求,尝试针对生态系统一体化生态保护修复工程提出强调尺度效应及综合成效的新型技术框架,以期项目综合评估工作提供技术指导,并为补充完善一体化生态保护修复技术标准体系提供理论支撑。

1 生态保护修复成效评估现状

目前,成效评估大致分为基于指标的评估、基于生态系统服务及其价值的评估、综合指数评估以及荟萃分析四大类。

1.1 基于指标的成效评估

基于指标的方法是当前最为常用和直观的成效评估手段,根据评估需求,研究所用指标可以是单个或多个指标^[22-23]以及指标体系^[24-25]。例如,Lu 等^[26]对我国六大生态修复工程(三北防护林工程、长江和珠江防护林工程、天然林保护工程、退耕还林工程、京津沙源治理工程、退牧还草工程)的森林、灌丛和草地生态系统的生物量及土壤碳进行了大规模实地调查,分析了上述工程对陆地碳汇的贡献;邵全琴等^[27]在构建包括生态系统宏观结构、生态系统质量和生态系统服务 3 大类、6 个一级指标和 9 个二级指标在内的指标体系基础上,利用地面监测、遥感数据结合模型模拟,评估了三北防护林建设、退耕还林、退牧还草、三江源生态保护和建设等九大生态工程实施 20 年后的生态效益;Versluijs 等^[28]以鸟类为指示性物种,评估森林生态系统恢复的情况。基于指标体系的方法关注生物、生境状况、生态系统结构功能等,对社会经济的关注较为缺乏^[29],仅有少数研究者评估了绩效管理方面的指标^[30-31]。

1.2 基于综合指数法的评估

对于评估目的较为复杂或尺度较大的保护修复工程,研究者倾向于采用基于综合指数^[32]的方法评估保护修复成效。例如,Valero 等^[33]利用河岸森林质量(QBR)指数^[34]评估了西班牙 Uria 河的生态恢复成效;Yang 等^[35]以物理结构完整性综合指数(PSI)来表征河岸生境状况,通过比较生态修复前后 PSI 值来评估河岸生态系统修复成效;Teng 等^[36]基于 RUSLE 模型评估了三峡库区森林恢复对土壤侵蚀控制的重要作用。

1.3 基于生态系统服务及其价值的评估

生态保护修复工程往往以提升生态系统服务为目标,因而一些学者以目标为导向,通过评估生态系统服务与价值的提升情况,衡量工程成效。例如,Comer-Warner 等^[37]利用气体通量法测算了红树林恢复对于减轻污染和减少沿海湿地温室气体排放的重要作用;Ouyang 等^[38]评估了中国大力投资生态保护修复背景下,全国范围 2000—2010 年食物供给、碳汇、土壤保持、防风固沙、水源涵养、防洪调蓄、生物多样性保护七项生态系统服务的变化情况;Han 等^[39]分析了退耕还林计划对延安市安塞区生态系统服务价值的影响;Hynes 等^[40]评估了挪威海草床修复带来的生态系统服务价值。

1.4 荟萃分析(Meta-Analysis)

由于荟萃分析具有将不同区域分散的研究成果转化为定量的、可重复的成果等优势,近年来,逐步被应用于大尺度生态保护修复成效分析研究中^[41-45]。然而,受限于研究方法、数据获取等方面的差异,荟萃分析结果的可靠性可能会受到影响。例如,Marchand 等^[46]指出:将退化状况低于参照水平(例如物种丰富度)的研究与退化状况高于参照水平(例如入侵植物盖度)放在一起分析,会高估总体成效。

综上所述,生态保护修复综合评估方法多样,评估目的与适用场景各有侧重。基于指标以及综合指数的评估方法是对生态系统进行客观描述,后者的结果展现形式更为简洁、易于比较;基于生态系统服务与价值的评估方法以目标为导向,但往往适用于较大尺度的研究,评估范围可能超出修复措施实际实施的范围;荟萃分析适用于大尺度甚至全球尺度的研究,但研究结果存在较大不确定性。

从各国的实践经验来看,生态保护修复工作由单一要素走向区域协同、陆海统筹已成为必然趋势。国际生态恢复学会(Society for Ecological Restoration, SER)发布的《生态恢复实践的国际原则与标准》(第二版)^[47]以及 IUCN 发布的森林景观恢复^[48]与基于自然的解决方案相关指南^[49]均强调了要大尺度下开展生态保护恢复的重要性。在景观尺度下,强调结构、格局、过程、动态,关注社会经济可持续性的生态修复尚处起步阶段,对各类生态系统进行整体保护、系统修复的理论方法仍在研究与探索中^[50]。因此,研究层面,针对国土空间内的一体化保护修复工程开展成效评估仍需理论与技术支撑;实践层面,在国土空间规划与用途管制要

求下,评估山水林田湖草沙一体化保护和修复工程较之于传统生态修复有何优势,也是管理者与实践者的迫切需求。

2 一体化保护和修复评估工作的主要挑战

综合考虑一体化保护和修复工程的设计目标、实际实施情况以及管理需求,当前综合成效评估技术主要面临如下几个挑战。

2.1 项目类型多

山水林田湖草沙一体化保护和修复是在一定国土空间范围内,针对受损、退化、服务功能下降的若干生态系统进行整体保护、系统修复、综合治理。项目涉及森林、草原、水体、农田等多类型生态系统,以及居民点和城镇空间,不同项目的修复技术与措施具有较大差异,评估方法较难统一。

2.2 空间尺度多

作为我国第一个按照“山水林田湖草是一个生命共同体”理念系统指导我国生态保护修复实践并带有通则性质的规范,《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》引入尺度的概念,设定了区域(或流域)、生态保护修复单元以及场地三级尺度,要求在三级尺度下分别开展工程规划、工程设计以及工程实施,同时对应不同的工作目标。因此,评估工作需要三个尺度分别考虑评估内容、设计相应指标体系,同时兼顾三个层次的衔接。

2.3 目标维度多

生态保护修复工程成效评估与生态系统状况评估最大的区别之一是要考虑人的因素,即工程人为活动的工作量及其对生态系统的影响,以及生态系统变化对人类社会的影响,因此评估指标体系设计既要包括成效类指标也要包括绩效类指标。成效类指标应考察生态系统的问题、数量、质量、功能变化,以及工程对社会经济发展福祉提升的贡献;绩效类指标则要服务管理需求,考察工程量等目标是否完成。

2.4 实施周期短

一体化保护和修复工程自2016年开始实施,其生态效益在短期内难以凸显,一些生态重建的区域甚至可能会存在生态系统服务下降的情况。为此,成效评估中的生态效益应考虑生态保护修复工程的长期性与不确定性,制定长期的生态系统监测计划以及面向未来的评估方案,从而为措施调整与适应性管理提供基本依据。

3 一体化保护和修复综合成效评估的技术框架

3.1 总体思路

为应对上述挑战,山水林田湖草沙一体化保护和修复工程的成效评估较之于传统的单一要素、单一类型的生态保护修复工程成效评估更为复杂。首先,除了需要依据常规方法对各类项目的社会、生态、经济效益进行评估之外,还需要考虑子项目、保护修复单元、工程范围三个空间尺度,对工程措施与其生态效应之间的关系、不同类型子项目的关联性与协同性、工程的整体性与系统性等进行分析。其次,工程整体实施周期一般为三年,每个子项目的起始和结束时间不同,考虑到工程措施作用于生态系统后其演替具有的不确定性,工程实施结束后既要开展综合成效评估,也要定期开展跟踪评估,并对发现的重大问题提出相应整改意见或制度性建议。再次,项目资金来源包括中央财政、地方财政以及社会资本投入三部分,从管理角度出发,评估也应满足管理需求^[51],服务绩效考评,为项目监管、年度中央奖补资金分配、奖惩措施确定、后续项目和资金安排等工作提供依据。

为此,本研究拟构建基于子项目、保护修复单元以及工程实施范围三个尺度的、兼顾技术逻辑与行政逻辑的一体化保护和修复工程综合成效评估框架。

3.2 框架构建原则

3.2.1 整体性与系统性相结合

遵循山水林田湖草生命共同体的理念,统筹考虑景观尺度下不同类型生态系统保护修复的协同作用,分

析不同类型项目的实施与完成情况,考量不同尺度目标的达成情况。

3.2.2 科学性与可行性相结合

兼顾评估方法的科学性以及计算过程的复杂性,将科学逻辑与管理逻辑进行统一,形成既具备科学性,又能满足管理需求的评估思路。

3.2.3 定量与定性方法相结合

综合考虑原始数据及相关参数的可获取程度、评估操作的简便性、评估结果的可读性等因素。在保证科学性的基础上,综合运用定量与定性方法,尽量选择数据易获取、计算简便、结果直观的指标。

3.3 评估框架

总体评估框架分为四个部分(图 1):第一,依据工程实施方案回顾项目总体目标以及拟解决的问题;第二,构建基于工程实施期间以及面向未来的评估指标体系;第三,明确各类指标测算方法,收集确定相关数据与参数;第四,对工程综合成效评估结果进行测算,并对典型案例生态效益进行预测。

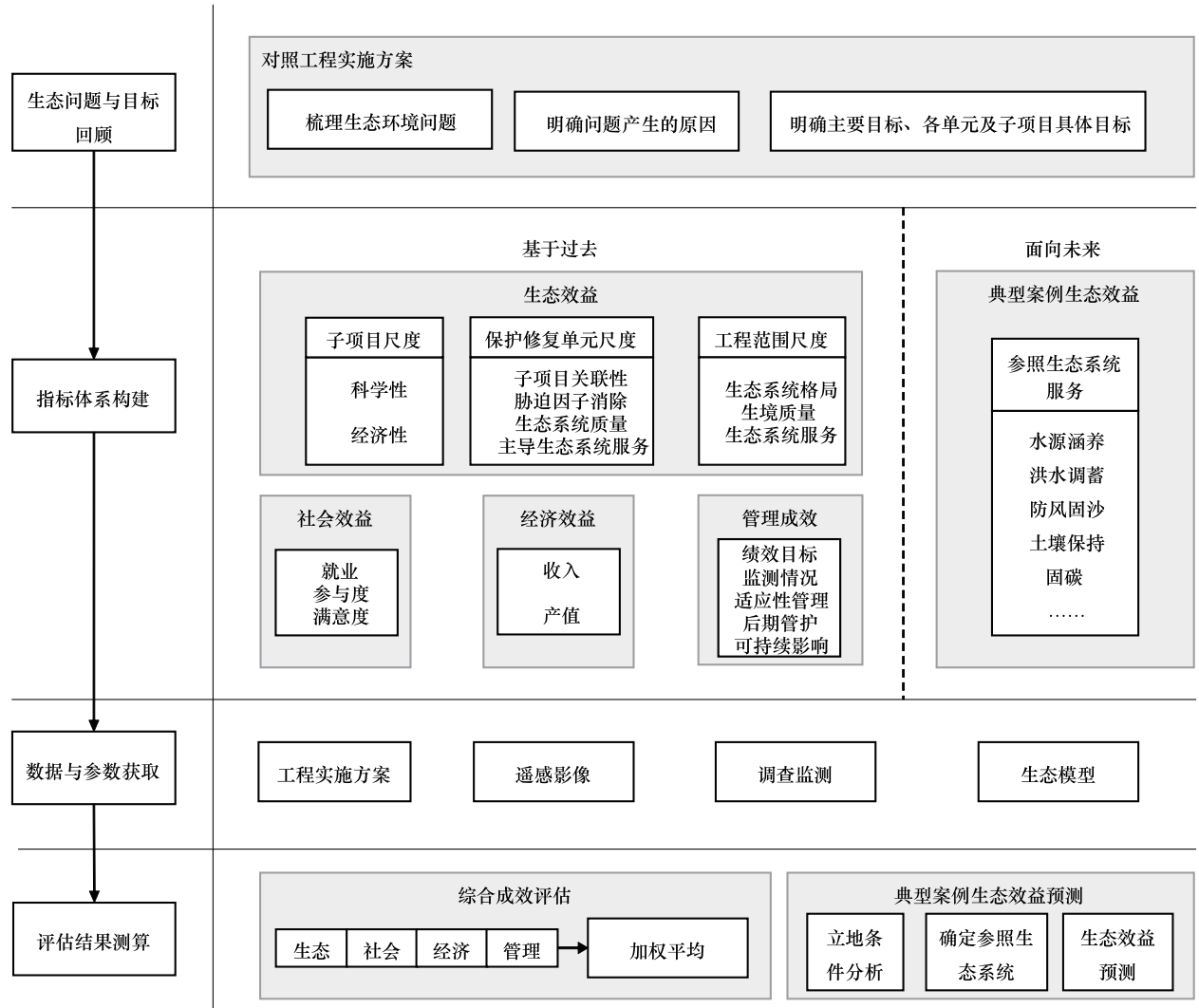


图 1 山水林田湖草沙一体化保护和修复工程综合成效评估技术框架

Fig.1 Technical framework for effectiveness evaluation of holistically ecological conservation and restoration project of mountains, rivers, forests, farmlands, grasslands, and deserts

3.3.1 回顾生态问题与保护修复目标任务

依据工程实施方案,明确评估范围。梳理植被退化、土壤侵蚀、土地沙化、土地盐渍化、地质灾害、土壤污

染、农田地力退化、水体污染、生境破碎化等突出生态环境问题的空间分布、程度和主要驱动力。明确工程近期与远期目标,以及实施区域、各个保护修复单元、各个子项目的具体目标。

3.3.2 确定指标体系

就评估维度而言,综合成效评估指标体系由生态、社会、经济效益以及管理成效四部分构成;就评估尺度而言,生态效益评估包括子项目、保护修复单元、工程范围三个尺度(表1);就生态系统的动态度而言,指标设计既包括针对实施期限内生态系统变化的综合成效评估,也包括面向未来的生态效益预测。

表1 山水林田湖草沙一体化保护和修复工程综合成效评估指标体系

Table 1 Index system for effectiveness evaluation of holistically ecological conservation and restoration project of mountains, rivers, forests, farmlands, grasslands, and deserts

一级指标 Level 1 indicators	二级指标 Level 2 indicators	指标解释 Descriptions of indicators	评估对象 Evaluation objects
生态效益 Ecological effects	科学性	评估各个子项目措施选择及时序安排是否满足科学性要求	子项目
	经济性	评估各子项目是否满足避免过度修复等经济性要求	
	子项目关联性	评估保护修复单元内,各个子项目关联程度	保护修复单元
	生态胁迫因子消除程度	采用定性与定量结合的方式,依据保护修复单元问题诊断结果,从水土污染消除、自然资源开发强度管控、外来物种入侵控制等方面,评估生态胁迫因子消除情况	
	生态系统质量	采用定性与定量结合的方式,从植被覆盖度、生物量、土地沙化、土壤盐渍化、物种丰富度等方面评估工程实施后生态系统质量与本底条件的差异	
	主导生态系统服务	采用定性与定量结合的方式,依据保护修复单元主导生态系统服务,从水源涵养、洪水调蓄、防风固沙、土壤保持、固碳等方面评估工程实施后,各单元主导生态系统服务与本底条件的差异	
	景观破碎度	评估工程实施后,景观破碎度与生态本底差值	工程范围
	生境质量指数	评估工程实施后,生境质量指数与生态本底差值	
	生态系统服务提升	采用定性与定量结合的方式,从水源涵养、洪水调蓄、防风固沙、土壤保持、固碳等方面评估工程实施后工程范围内生态系统服务与本底条件的差异	
社会效益 Social effects	新增就业岗位	采取定量与定性结合的方法,评估工程实施是否带来了充足的就业岗位	
	社会资本参与度	采取定量与定性结合的方法,评估社会资本是否充分参与了保护修复工作	
	本地居民参与度	采取定量与定性结合的方法,评估本地居民是否全过程参与了工程规划、实施、验收、管护等各个环节	
	本地居民满意度	采取定量与定性结合的方法,评估本地居民对工程实施的满意程度	
经济效益 Economic effects	本地居民收入提升量	采取定量与定性结合的方法,评估工程是否显著增加了本地居民的收入	
	生态相关产业生产总值增量	采取定量与定性结合的方法,评估工程是否充分带动了相关产业的发展	
管理成效 Management effects	绩效目标完成度	计算工程总体绩效目标指标完成的百分比	
	监测点布设合理性	评估监测点位数量、空间分布合理程度	
	监测指标科学性	评估监测指标构建的科学合理程度	
	监测数据完整性	评估监测数据完整程度	
	适应性管理	评估是否根据长效跟踪监测评估发现的生态风险,建立了相应处置机制并采取了应对措施	
	管护机制建立情况	评估是否建立规模化、专业化、社会化运营管护机制,是否落实管护责任人、管护经费	
	管护措施落实情况	评估是否做好了基础设施的运行和维护	
	可持续影响	评估项目前期建立的山水林田湖草沙一体化保护和修复组织机制、管理模式是否持续发挥作用	

生态效益从三个尺度进行评估:子项目尺度评估项目措施的科学性以及经济性;保护修复单元尺度评估其子项目的关联性,该单元的主要生态问题解决情况,生态系统质量变化,以及根据功能定位确定的主导生态系统服务变化情况;工程范围尺度评估保护修复工程带来的景观格局和生境质量变化以及生态系统服务整体变化情况。社会效益主要考虑工程为本地居民创造的就业机会、利益相关方特别是本地居民的参与度与满意度、社会资本投入程度。经济效益评估主要考虑居民收入变化以及产业发展。管理成效主要考虑绩效目标完成情况、监测计划的制定与执行情况、后期管护的实施情况以及项目可持续性。

3.3.3 数据与参数获取

评估工作所需数据、参数及获取途径如下:评估对象主要生态问题通过遥感调查结合实施方案获得;评估对象土地利用变化情况、生态系统结构变化、植被指数、生物量等数据主要通过分析遥感影像获得;水环境以及生物多样性变化等情况主要通过调查监测获得;生态系统服务计算需在遥感影像基础上结合文献资料确定生态模型所需参数。

3.3.4 评估结果测算

依据筛选出的评估指标,确定评分计算方法及指标权重,形成评估方案。工程实施后两年内开展首次评估,随后每五年开展跟踪评估。评估工作包括生态、社会、经济、管理综合成效评估,以及必要时开展的生态效益预测两部分内容。

(1) 生态、社会、经济、管理综合成效评估

生态、社会与经济效益以定量分析为基础,结合专家打分进行评估;管理成效主要通过专家打分进行定性评估,打分方式均为百分制。生态效益评估首先以保护修复工程实施前五年各指标的平均水平作为本底条件,在此基础上定期监测各指标变化情况。专家在综合考虑生态系统类型、本底条件、气候等自然因素的前提下,对各个生态指标的改善情况进行打分。社会、经济效益通过抽样调查/访谈结合统计数据分析,测算工程实施前后指标变化量,在此基础上结合当地社会经济发展实际情况,对社会、经济指标改善情况进行打分。管理成效评估由专家对项目完成情况与管理工作进行打分。

评估结果采用加权平均的方式进行测算。鉴于生态保护修复工程核心目标为生态效益,兼顾社会与经济效益,同时适当考虑管理目标,一级指标生态、社会、经济效益以及管理成效的权重系数建议设定为 0.5、0.2、0.2、0.1;二级指标的权重系数应综合考虑区域主要生态问题,生态保护修复目标以及评估工作的实际需求加以确定。

(2) 生态效益预测分析

鉴于生态保护修复工程的生态效益需要较长时间才能得以体现,工程实施结束后生态系统服务提升可能不显著,因而在必要时可辅以远期生态效益预测。

选择典型案例,考虑自然生态系统的空间分异规律,在工程实施的同一地理分区或生态分区范围内,选择工程实施前 5—10 年相对生物量密度数值/植被覆盖度数值排名前 10% 的区域的各项参数平均值作为参照系。首先,测算预期生态效益,即修复区内所有受损生态系统均恢复至其对应的参照系时生态系统服务的功能量。其次,根据生态系统演替年限,结合生态修复的预期生态效益,测算生态系统演替过程中逐年的生态效益及其对所属分区或行政单元的贡献率。最后,测算生态系统演替过程中逐年产生的经济价值,结合生态修复成本测算生态修复的成本效益及其时间动态。

4 研究展望

本研究在总结梳理当前生态保护修复成效评估实践中存在的问题及面临的挑战之基础上,创新性地研究构建了基于子项目、保护修复单元以及工程实施范围三个尺度的,面向未来具有动态特征的,适用于景观尺度多要素的生态系统一体化保护和修复工程综合成效评估框架。除多尺度特征外,本研究还在传统的以生态效益为主的评估方式基础上,结合项目管理实际需求,加入了社会、经济效益及管理成效。评估框架兼顾了技术

逻辑与管理需求,不仅可以分析单项生态保护修复工程取得的成效,还可横向对比同类工程的实施效果。本研究可为完善山水林田湖草沙一体化保护和修复标准体系,推进国土空间整体保护、系统修复、综合治理提供技术支撑。

本研究提出的新型评估框架尚存在诸多不足,需要在未来加以进一步完善,以提高方法的实用性:1)当前研究仅提供了评估的主体思路与技术框架,未来需要加强案例研究,验证方法的可行性;2)生态系统变化受气候条件与人为因素共同作用,本框架可评估生态保护修复工程实施前后各类生态指标的变化情况,但无法体现气候条件对生态恢复的作用。未来可进一步对比项目实施区域内外生态指标变化情况的差异,以消除气候条件改变对生态系统产生的影响;3)针对国家重大生态保护修复工程成效的评估,往往在大尺度开展^[7-9],但保护修复的具体工程以及产生的实际工作量,往往是在场地尺度得以体现。本研究通过景观格局优化指标初步建立了具体修复工程与景观尺度生态恢复的关系,未来应进一步研究小尺度的恢复工程对于区域/流域生态系统服务提升的贡献。在此基础上,进一步研究如何科学布局子项目,使得工程实施产生成本效益最优的结果。

参考文献 (References):

- [1] 刘东生, 钟祎. 安远县水土保持生态修复试点的成效与经验. 中国水土保持, 2004(5): 35-36.
- [2] 杨永峰, 周秀国. 山东省水土保持生态修复成效与经验. 中国水土保持, 2004(12): 13-13, 23.
- [3] 王磊, 刘得力, 王红漪, 魏婧华. 平邑县水土保持生态修复工程成效与经验. 中国水土保持, 2006(5): 28-29.
- [4] 孙峰. 盐池县水土保持生态修复成效显著. 中国水土保持, 2007(8): 38-39.
- [5] 马明娟, 杨琰, 李滨. 捞鱼河口湖滨生态修复工程措施及成效. 环境科学导刊, 2007, 26(5): 26-28.
- [6] 李强, 栾天新. 凌河保护区水生态修复实践与成效分析. 东北水利水电, 2015, 33(11): 40-41.
- [7] 陈曦, 包安明, 王新平, 古丽·加帕尔, 黄粤. 塔里木河近期综合治理工程生态成效评估. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 20-28.
- [8] 何兴元, 贾明明, 王宗明, 任春颖, 郑海峰, 郭跃东, 张新厚, 辛晓平. 基于遥感的三江平原湿地保护工程成效初步评估. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 3-10.
- [9] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 杨勤科, 赵敏娟, 党小虎, 郭明航, 王国梁, 王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.
- [10] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 刘璐璐. 基于目标的三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估及政策建议. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 35-44.
- [11] Lüderitz V, Speierl T, Langheinrich U, Völkl W, Gersberg R M. Restoration of the Upper Main and Rodach Rivers-The success and its measurement. Ecological Engineering, 2011, 37(12): 2044-2055.
- [12] Januschke K, Jähnig S C, Lorenz A W, Hering D. Mountain River restoration measures and their success(ion): effects on river morphology, local species pool, and functional composition of three organism groups. Ecological Indicators, 2014, 38: 243-255.
- [13] Stoffers T, Buijse A D, Geerling G W, Jans L H, Schoor M M, Poos J J, Verreth J A J, Nagelkerke L A J. Freshwater fish biodiversity restoration in floodplain rivers requires connectivity and habitat heterogeneity at multiple spatial scales. Science of the Total Environment, 2022, 838: 156509.
- [14] Kang D W, Lv J, Li S, Chen X Y, Wang X R, Li J Q. Integrating indices to evaluate the effect of artificial restoration based on different comparisons in the Wanglang Nature Reserve. Ecological Indicators, 2018, 91: 423-428.
- [15] Brouwer R G, Zuidema P A, Chiriboga-Arroyo F, Guariguata M R, Kettle C J, Ehrenberg-Azcárate F, Quaedyvlieg J, García Roca M R, Corvera-Gomringer R, Vargas Quispe F, Jansen M. Establishment success of Brazil nut trees in smallholder Amazon forest restoration depends on site conditions and management. Forest Ecology and Management, 2021, 498: 119575.
- [16] Xu Y D, Dong S K, Gao X X, Wu S N, Yang M Y, Li S, Shen H, Xiao J N, Zhi Y L, Zhao X Y, Mu Z Y, Liu S L. Target species rather than plant community tell the success of ecological restoration for degraded alpine meadows. Ecological Indicators, 2022, 135: 108487.
- [17] Grabowski J H, Leslie H M, Scyphers S, Williams S L. Inclusion of biodiversity in habitat restoration policy to facilitate ecosystem recovery. Conservation Letters, 2018, 11(3): e12419.
- [18] Coen L D, Luckenbach M W. Developing success criteria and goals for evaluating oyster reef restoration: ecological function or resource exploitation? Ecological Engineering, 2000, 15(3/4): 323-343.
- [19] Camacho A, Peinado R, Santamans A C, Picazo A. Functional ecological patterns and the effect of anthropogenic disturbances on a recently restored Mediterranean coastal lagoon. Needs for a sustainable restoration. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 114: 105-117.
- [20] van der Heide T, Temmink R J M, Fivash G S, Bouma T J, Boström C, Dideren K, Esteban N, Gaecle J, Gagnon K, Infantes E, van de Koppel J, Lengkeek W, Unsworth R, Christianen M J A. Coastal restoration success via emergent trait-mimicry is context dependent. Biological Conservation, 2021, 264: 109373.
- [21] 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.
- [22] 齐建春, 韩朋, 齐春花, 孙婷婷, 董召光, 颜梦宇, 王兵. 北京市怀柔区琉璃河生态修复工程的成效. 水土保持通报, 2016, 36(6): 146-149.
- [23] 彭艳红, 靖玉明, 刘道行, 孟飞. 南四湖新薛河湖滨带湿地修复效果评价. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 134-137.
- [24] 廖迎娣, 张欢, 侯利军, 陈达. 江苏长江岸线生态修复评价指标体系研究. 生态学报, 2021, 41(10): 3910-3916.

- [25] 梁朝铭, 曹庆一, 杨柳, 吴涛, 王琦琦. 山水林田湖草生态修复评价指标体系构建——以铜川市为例. 能源与环保, 2021, 43(7): 105-113.
- [26] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [27] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 刘国波, 杨帆, 张雄一, 牛丽楠, 黄海波, 樊江文, 刘纪远. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估. 地理学报, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [28] Versluijs M, Hjältén J, Roberge J M. Ecological restoration modifies the value of biodiversity indicators in resident boreal forest birds. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 104-111.
- [29] 吴霖, 欧阳玉蓉, 吴耀建, 蔡灵, 戴娟娟. 典型海洋生态系统生态修复成效评估研究进展与展望. 海洋通报, 2021, 40(6): 601-608, 682.
- [30] 欧阳玉蓉, 戴娟娟, 吴耀建, 方婧, 赖敏, 蔡灵, 吴霖. 海洋生态修复项目绩效评估指标体系研究. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 91-99.
- [31] 何帅, 段晓伟, 郝林华, 夏涛, 李晓莉, 陈尚. 面向管理的海洋修复工程生态绩效考核指标体系构建研究. 中国环境管理, 2021, 13(2): 47-54.
- [32] 张剑, 赵进勇, 彭文启, 付意成. 基于自然解决方案的流域生态修复成效评估研究. 水电能源科学, 2021, 39(12): 69-72.
- [33] Valero E, Picos J, Álvarez X. Characterization of riparian forest quality of the Umia River for a proposed restoration. *Ecological Engineering*, 2014, 67: 216-222.
- [34] Munné A, Prat N, Solà C, Bonada N, Rieradevall M. A simple field method for assessing the ecological quality of riparian habitat in rivers and streams: QBR index. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2003, 13(2): 147-163.
- [35] Yang G, Li Y, Huang T Q, Fu B L, Tang J, Zhang X, Wu J S. Multi-scale evaluation of ecological restoration effects in the riparian zone using Landsat series images from 1980 to 2019. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108342.
- [36] Teng M J, Huang C B, Wang P C, Zeng L X, Zhou Z X, Xiao W F, Huang Z L, Liu C F. Impacts of forest restoration on soil erosion in the Three Gorges Reservoir area, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134164.
- [37] Comer-Warner S A, Nguyen A T Q, Nguyen M N, Wang M L, Turner A, Le H E, Sgouridis F, Krause S, Kettridge N, Nguyen N, Hamilton R L, Ullah S. Restoration impacts on rates of denitrification and greenhouse gas fluxes from tropical coastal wetlands. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 149577.
- [38] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [39] Han X J, Yu J L, Shi L N, Zhao X C, Wang J J. Spatiotemporal evolution of ecosystem service values in an area dominated by vegetation restoration: Quantification and mechanisms. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108191.
- [40] Hynes S, Chen W T, Vondolia K, Armstrong C, O'Connor E. Valuing the ecosystem service benefits from kelp forest restoration: a choice experiment from Norway. *Ecological Economics*, 2021, 179: 106833.
- [41] Ren Y J, Lü Y H, Fu B J, Zhang K. Biodiversity and ecosystem functional enhancement by forest restoration: a meta-analysis in China. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7): 2062-2073.
- [42] Meli P, Holl K D, Rey Benayas J M, Jones H P, Jones P C, Montoya D, Moreno Mateos D. A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171368.
- [43] Crouzeilles R, Ferreira M S, Chazdon R L, Lindenmayer D B, Sansevero J B B, Monteiro L, Iribarrem A, Latawiec A E, Strassburg B B N. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science Advances*, 2017, 3(11): e1701345.
- [44] Jones H P, Jones P C, Barbier E B, Blackburn R C, Rey Benayas J M, Holl K D, McCrackin M, Meli P, Montoya D, Mateos D M. Restoration and repair of Earth's damaged ecosystems. *Proceedings Biological Sciences*, 2018, 285(1873): 20172577.
- [45] Atkinson J, Brudvig L A, Mallen-Cooper M, Nakagawa S, Moles A T, Bonser S P. Terrestrial ecosystem restoration increases biodiversity and reduces its variability, but not to reference levels: a global meta-analysis. *Ecology Letters*, 2022, 25(7): 1725-1737.
- [46] Marchand L, Castagnérol B, Jiménez J J, Rey Benayas J M, Benot M L, Martínez-Ruiz C, Alday J G, Jaunatre R, Dutoit T, Buisson E, Mench M, Alard D, Corcket E, Comin F. Conceptual and methodological issues in estimating the success of ecological restoration. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107362.
- [47] Gann G D, McDonald T, Walder B, Aronson J, Nelson C R, Jonson J, Hallett J G, Eisenberg C, Guariguata M R, Liu J G, Hua F Y, Echeverría C, Gonzales E, Shaw N, Decler K, Dixon K W. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 2019, 27(S1): S1-S46.
- [48] Beatty C, Cox N A, Kuzee M. Biodiversity guidelines for forest landscape restoration opportunities assessments. First edition. Gland, Switzerland: IUCN, International Union for Conservation of Nature, 2018.
- [49] IUCN Global Standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS; first edition. Gland: IUCN, International Union for Conservation of Nature, 2020.
- [50] 周妍, 陈妍, 应凌霄, 杨崇曜. 山水林田湖草生态保护修复技术框架研究. 地学前缘, 2021, 28(4): 14-24.
- [51] 李少帅, 卢丽华. 生态保护修复工程实施成效评估的构想. 中国土地, 2022(3): 12-15.