

甄霖, 谢永生. 典型脆弱生态区生态技术评价方法及应用专题导读. 生态学报, 2019, 39(16): 5747-5754.

Zhen L, Xie Y S. Evaluation method and its application of ecological restoration technology for typical ecological vulnerable regions. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5747-5754.

典型脆弱生态区生态技术评价方法及应用专题导读

甄霖^{1,2,*}, 谢永生^{3,4}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

4 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要:全球经济发展和日益增强的人类活动给业已脆弱的生态系统带来了巨大挑战, 寻求尊重自然规律、环境友好的生态治理与恢复技术成为实现联合国可持续发展目标的重要组成部分。近年来, 国内外科学家和生态治理机构研发出了一系列技术体系和技术模式, 对脆弱生态区退化生态系统展开了全面的治理和恢复。然而, 缺乏对这些治理技术的评价和优选方法的研发和应用在很大程度上限制了优良技术的筛选和推广应用, 造成了资金和人力的浪费和损失。针对这些问题, 科技部在 2016 年启动了国家重点研发计划项目“生态技术评价方法、指标体系与全球生态治理技术评价”, 其中重要的任务之一是对生态技术进行梳理、评价和优选。本文旨在对已有的评价方法和指标体系的研究进展进行系统梳理, 对生态技术的特征、生态技术评价的基本步骤和原则、生态技术的三阶段评估方法等进行了界定和深入分析, 对本专题收录的 14 篇学术文章所涵盖的评价方法和模型研发、案例应用等进行了介绍, 以期筛选优良技术、提高生态技术应用效果、促进优良技术的输出和引进提供参考。

关键词:生态技术; 生态退化; 典型脆弱生态区; 三阶段评价法

Evaluation method and its application of ecological restoration technology for typical ecological vulnerable regions

ZHEN Lin^{1,2,*}, XIE Yongsheng^{3,4}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 School of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture & Forest University, Yangling 712100, China

4 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Global economic development and increasingly intensive human activities have brought severe challenges to already vulnerable ecosystems, thus, development and application of ecological restoration technologies that compliance with nature and environmentally friendly has been becoming an important component for achieving United Nation's Sustainable Development Goals. Over the past decades, scientists and ecological restoration agencies around the world have developed lots of restoration technologies and modes, which have played important roles for rehabilitation of degraded ecosystems. However, selection and application of best technologies and practices have been limited from lack of methods and models for evaluation and assessment of the existing technologies, leading to overlapping and wasting of investment of funds and human resources to the development of the restoration technologies. This problem is more serious in China than the rest of the world, given that the Chinese government has been putting lots of funds to restoration of the degrading ecosystems since 2000, of which, about 214 core technologies, 64 models and more than 100 technological systems have been developed and

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0503700)

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenl@igsrr.ac.cn

adopted to restoration of the ecosystem that are degrading. There is a high need to develop methods and models that can be used to assess and evaluate the effectiveness of these existing restoration technologies. In line with such demand, the Ministry of Science and Technology of China launched a national key Research and Development program entitled “Methods and indicator systems for assessing ecological restoration technology, and evaluation of ecosystem rehabilitation approaches from around the world (grant number: 2016YFC0503700)”. This paper aims to make an overall review of the evaluation methods and indicator systems, define the characteristics of restoration technologies, propose the basic principles and steps for assessing restoration technologies, as well as the Three Phase Evaluation Method (THEM) for assessing ecological restoration technologies. It also introduces the 14 papers that are accepted in this thematic issue based on the progress that the project has partially achieved so far, which cover the perspectives related to evaluation of restoration technologies such as methods and techniques for evaluating the technologies, model development, and the pilot studies that applied these methods and models. It is expected that the publication of this thematic issue will contribute to the methodological development and selection of best restoration technologies and practices, improve the effectiveness of the technology application, and provide guidance on import and export of restoration technologies among different regions and countries.

Key Words: ecological restoration technology; ecological degradation; typical ecological vulnerable regions; the Three Phase Evaluation Method

日益增强的人类活动导致全球约 60% 的生态系统处于退化或不可持续状态^[1-2], 荒漠化、水土流失、石漠化等退化土地已经至少占全球土地面积的四分之一^[3]。联合国防治荒漠化公约在 2018 年世界防治荒漠化和干旱日发布的评估报告中警告, 至 2050 年, 土地退化将给全球带来 23 万亿美元的经济损失, 但如果采取紧急行动, 投入 4.6 万亿美元就可以挽回大部分损失; 国别概况报告显示, 亚洲和非洲因土地退化遭受的损失为全球最高, 每年分别达 840 亿美元和 650 亿美元。在联合国发布的 2030 可持续发展的 17 个目标中, 就有 11 个与退化土地的治理有关^[4]。因此, 寻求尊重自然规律、环境友好的生态治理与恢复技术(简称生态技术)成为实现可持续发展目标的重要组成部分^[5]。

中国是生态退化最为严重的国家之一, 中度以上生态脆弱区面积占陆地总面积的 55%, 荒漠化、水土流失、石漠化、森林生态系统退化等问题突出, 占国土面积的 22% 左右^[6], 其中荒漠化面积占国土总面积 27.2%, 分布在 18 个省^[7]。针对退化问题, 早在 20 世纪 50 年代起就开始实施生态保护工程, 同时对西北干旱区生态恢复、黄土高原水土流失综合治理、南方喀斯特区生态恢复等技术开展了机理与示范研究, 形成了多种生态治理模式和修复技术^[8-9]。据报道, 我国自“十五”以来, 研发出了 214 项核心技术、64 个技术模式、100 多个技术体系^[10], 对脆弱生态区退化生态系统展开了全面的治理和恢复。

生态技术以受损自然生态学过程及其恢复机制为理论依据逐步发展而来, 经历了生态退化问题形成机制研究、退化过程监测方法研究、治理与修复技术研究等阶段^[11]。20 世纪早期开始, 美国、德国等发达国家启动了大批生态保护项目^[12-13], 并提出根据生态退化机理^[14]、生物适应性^[15]、生态稳定性机制^[16]等基本准则, 实现土地利用优化管理、退化区综合治理、保护性自然恢复^[17]。

2012 年联合国可持续发展大会提出“全球土地退化零增长”的愿景目标, 联合国防治荒漠化公约提出了预防性技术、减缓性技术、恢复和重建技术的针对不同退化土地的应对方案^[18]; “一带一路”提出“共建绿色丝绸之路、形成我国国际竞争新优势”行动计划, 十八大更是将“生态文明建设”建设写入了党的章程, 使生态文明建设的战略地位更加明确, 使我国的经济社会发展总体布局更加完善。因此, 总结国内外生态技术及其评价方法, 是我国生态建设和全球生态治理亟待进行的重大研究课题。在“十三五”规划中, 我国政府将生态文明建设和生态安全作为国家可持续发展战略的关键议题。然而, 长期以来我国生态技术的研发和应用始终与国家重大生态治理工程密切相关, 针对我国不同发展阶段和不同地区出现的不同生态问题, 针对性地研发和引进了大量生态技术, 但从生产实践效果分析, 关于生态技术及其理论方面的研究长期滞后于生产实践需求, 一

方面带来了技术研发的重复投资,造成了资金的浪费;另一方面造成了生态治理成果稳不住,治理工程结束后出现反弹,或出现边治理、边破坏局面。根据技术评估和预测结果,在生态修复技术领域,核心技术主要掌握在欧美国家,我国总体处于跟跑的状态;同时,研究与应用脱节,产业化水平低^[19]。针对这些问题,科技部在2016年启动了国家重点研发计划项目“生态技术评价方法、指标体系与全球生态治理技术评价”,其中重要的任务之一是对生态技术进行梳理、评价和优选。本专题收录的文章是该项目研究进展的部分成果,本文旨在对已有的评价方法和指标体系的研究进展梳理,介绍本专题研究文章的总体情况,为筛选优良技术、提高生态技术应用效果、促进优良技术的输出和引进提供参考。

1 生态技术的特征

技术因需求而产生,生态技术是因经济社会发展过程中出现的生态问题而产生。因而,人类社会在不同的经济社会发展阶段出现了不同的生态问题,也产生了不同的生态技术,生态技术的基本特征是具有经济社会属性、区域性和阶段性特征等,它与当时的生产力水平和人类对环境与经济社会持续发展的认知程度密切相关。从现有研究和实践应用的角度来看,生态技术广泛存在但目前尚无准确的、普遍认同的定义。一般而言,生态技术是指人类为解决现实或潜在的生态问题,协调人类与环境的关系,保障自然生态支撑经济社会持续发展而采取的各种技术手段^[20]。从功能和作用来看,生态技术是指可以促使生态原真性得到恢复,即生态系统结构恢复、功能提升,并具有持续性;能够调控人类的行为,促进人类的生产经营活动有利于生态安全,保障生态、经济和社会持续发展,体现节约资源和能源、避免或减少环境的退化与污染;生态技术应用带来的生态恢复,使得区域经济得到发展,公众收入水平提高;公众的社会参与意识和技能得到提高,有利于促进生态文明建设的生态技术^[21-23]。由此可见,生态技术还具有多目标性的特点,同时具有多层次、多功能的特性,是一个内容相对完整、结构相对稳定的技术体系,包括大类、中类、小类和细类4个层次,分别代表技术的专业序列、技术功能、技术实现手段、技术表现形式^[24-25]。为了更加清晰地认识和分析生态技术,实现技术集成和合理有效的组合,从技术属性的角度,将生态技术划分为生态治理技术类、生态经济技术类、生态社会技术三大类。从技术经济学、社会学角度,针对主要的生态退化类型及其诱发生态退化的经济社会学成因,按照生态技术的作用原理,可以分为工程技术、生物技术、农作技术、物理技术、化学技术、生态经济技术、生态管理技术等^[26-29],按照技术地位,可以分为核心技术和配套技术,例如草原水土保持技术中的围栏封育和划区轮牧为核心技术,同时配套有草场管理技术措施^[30]。

从实践应用的角度出发,技术及其配套使用主要表现为单项技术和技术模式的形式。单项技术是指直接作用于生态系统,通过促进生态恢复进而带动区域发展的单一技术,可以从作用原理、作用部位、细目、工艺描述、适用退化类型、适用地域、技术来源等方面加以描述。技术模式一般是针对特定地域生态退化问题及其治理的需求而形成的适宜该区域生态、经济、社会文化等背景,能促进生态安全和经济社会健康发展的一系列生态技术的有机组合和集成。其主要特点和组成要素包括地域相宜性,具有较高的科技含量、实用价值和推广潜力,比较成熟且具有成功案例支持,具备可重复性和可操作性,技术的使用具有阶段性和层次性。因此,技术模式是科技成果与当地自然、社会经济条件密切结合的产物^[31],其核心是调整人类生存发展与生态环境之间存在的合理、不协调的关系^[32]。技术模式可以从技术组成、适用退化类型、技术来源、适用地域、技术应用案例等方面加以描述。我国自“十五”以来,针对生态退化及其区域特点,研发出64个技术模式^[10],这些技术成果涵盖了水土流失治理、湿地保育、荒漠化防治、海岸带保护、重大生态工程保护和生态城市建设等多个方面,在全国不同生态类型区域示范推广500余万亩^[20],这些技术成果从技术层面上解决了脆弱生态区重大生态与环境问题的技术难点,实现了生态与经济相融合的高效性和可持续性,促进了区域生态安全与经济社会可持续发展^[33]。

国际生态恢复学会把生态恢复定义为有助于恢复退化的、受损的或毁坏的生态系统的过程^[34]。针对生态技术在生态恢复中的作用和特点,结合生态治理和恢复目标、退化阶段、驱动要素等,采用什么技术、怎么应

用、时间范围、以及成本估算等,都应当进行全面的考量。根据 Hobbs 和 Norton^[35] 及 Hobbs 和 Harris^[36] 的研究,恢复阈值是确定生态技术应用的关键要素,即是否进行修复以及采用什么措施(如生物还是非生物)进行修复,取决于生态退化的程度及其生态系统功能受影响的程度。由于生态退化-退化恢复-恢复巩固之间内在的动态关联性,“适应性生态恢复”的理念及其相关知识也受到了学术界、应用部门和利益相关者的高度认可和接受^[37-38],生态恢复的主旨是修复生态系统的功能和服务,而不仅仅是生物多样性,对于适宜的干预措施及其程度的选择,主要取决于治理目标、资源保障水平和空间尺度^[39]。这就要求治理技术的选择和应用具有高度的针对性,如退化问题针对性、退化阶段针对性、驱动机制针对性等。

2 生态技术评价及其方法体系

2.1 生态技术评价的基本步骤和原则

鉴于生态技术的多样性、动态性、时空特异性等特点,目前还没有统一的、公认的评价指标和方法对其加以评价和筛选。但是,在不同的研究领域,已经开展了对技术的评价研究,其中,确定评价步骤、评价指标的遴选原则和指标类型,是技术评价的基础。生态技术评价由相互关联的五个步骤组成,即技术识别、技术评估、技术优选、技术差距和技术推介(表 1),其中涉及到多学科方法,包括文献计量分析、案例研究、台站观测、实地问卷调查、专家知识、统计学分析和检验等,每个步骤都有其相应的阶段性产出,主要包括技术长清单、评价结果、技术优选、技术差距和地位以及技术推介和技术引进与输出等。其中,对优选技术中的核心关键技术需要提供详细信息,包括技术的描述、国内对该技术的掌握程度、技术的国外拥有方、技术的发展现状等。障碍分析是优选核心技术研发、转化和传播不可或缺的重要环节,需要在深入探究个体障碍的基础上,分析障碍之间的关联性,确定主要的障碍以及可避免的障碍,对主要障碍需要作进一步的原因分析,找出克服的方法^[40]。通过这些步骤推荐出的生态技术,不仅具有科学价值,同时也对解决退化问题具有较强的针对性。

表 1 生态技术评价步骤
Table 1 Steps for evaluating ecological restoration technologies

步骤 Step	内容 Content	方法 Method	产出 Output	备注 Note
第一步	技术识别	实地调研、文献分析、专家知识	技术清单	应用技术清单模板
第二步	技术评估	多维度评价指标、模型;台站监测	技术评价结果	技术的优、劣评价
第三步	技术优选	MCDA、AHP、最小成本法等	优选技术清单	确认优先技术
第四步	技术差距	案例剖析;文献计量;国际组织报告	国内外差距和地位分析	针对核心关键技术*;地位;领跑、并跑、跟跑
第五步	技术推介	案例剖析;文献计量;国际组织报告	技术研发、推广和转让分析报告	明确地域;障碍分析及消除措施

MCDA:多准则决策分析法;AHP:层次分析法;*核心关键技术:从第三步的“优先技术”中遴选而来

生态技术评价指标选取需要遵循一定的原则,可以从两个层面来考虑:从宏观层面,生态技术评价需要考虑联合国可持续发展指标所涵盖的方面;和国家发展指标关联、充分考虑其中长期经济、环境和社会优先发展领域^[41-42];对照 IUCN 濒临灭绝的动物“红名单”,评价生态技术在生物多样性保护中的贡献^[43];类似的还要考虑人类活动如人工单一种植引起的生物多样性丧失和生态系统抵御病虫害能力的下降^[18];要针对退化问题、退化阶段、驱动要素,同时,紧密结合治理目标,确定评价的指标体系。从操作层面,在指标遴选中,需要充分考虑其与所评价技术的相关性、可度量性、数据可获取性、指标值的可对比性、具有评判阈值或标准、具有可预见性、具有综合性并能涵盖所评价维度的主要特性^[38]。利益相关者在指标遴选和阈值确定全过程的参与,对于选取一套有效的指标体系,起着至关重要的作用^[44-47]。

2.2 生态技术评价方法

近十余年,在全球生态退化问题日趋严峻的形势下,一些重要的国际组织从不同层面提出了技术评价的

维度、开展了评价工作。联合国发展计划署出版的技术需求评估指南^[43],从技术应用对国家优先发展领域的贡献、技术的温室气体减排潜力(减缓)、技术对减低气候变化脆弱性的贡献潜力(适应),以及投资成本、投资的利润或收回成本的潜力、市场潜力等方面对气候变化的技术进行评价,被认为是比较全面和客观的评价方法体系。之后开展的一系列国别评价,很好地界定和优选了所需技术。如赞比亚在 UNEP、GEF 等资助下,对水资源、农业和粮食安全两个重要行业的技术需求进行了评估,形成了技术需求清单,并重点对技术转化的障碍和应对措施进行了深入分析^[40]。IPCC 进行了国际农业、林业和土地利用减缓气候变化技术评价^[48],提出要从技术的减排潜力、技术实施的难易程度、技术的应用阶段等方面,对减缓技术进行评价,其中广泛应用了技术指标打分、权重汇总等评价方法,对相关技术进行评价、排序、优选及核心关键技术的国内外地位和差距分析。《联合国防治荒漠化公约》明确提出针对荒漠化治理技术,其转让、获取、改造和研发,需要依照各自国家的立法和政策来选择无害环境、经济上可行、社会上可接受的技术,尤其是在顾及知识产权的基础上,获取可实际用来解决当地群众需要的技术,及其传统的和当地的技术、知识、诀窍和做法,同时要特别注意这类技术的社会、文化、经济和环境的影响^[41]。针对 SDG 目标 15.3 中“退化土地占比”指标的研究,UNCCD 建立了对土地覆被、净初级生产力、土壤碳的监测和评估的概念框架和方法体系,以实现荒漠化、干旱和洪涝引起的土地退化零增长^[18]。

技术经济学特别强调技术的经济效果评价,即实现技术方案时的产出与投入比,认为技术和经济在人类进行物质生产、交换活动中始终存在,是不可分割的两个方面,技术具有强烈的应用性和明显的经济目的性,没有应用价值的技术是没有生产力的。同时,任何技术的产生与应用都需要经济的支持,受到经济的制约。经济效果包括可以用经济指标度量的和不能用经济指标度量的产品和服务,包括正效果也包括负效果,包括数量指标、质量指标和时间指标;投资回收期法、净值法、内部收益率法等常用于技术经济性评价^[49]。成本有效性(Cost-effectiveness)可以帮助在一定成本条件下识别出能够达成某个环境目标的有价值、最合适的技术选项,成本包括建设成本以及运行和维修成本,成本分析是对技术进行优先排序的有效方法,可以在技术评价之后开展^[42],因此,成本有效性的评估结果,常常作为技术选择的“一票制”指标应用。生态技术的成本高低,既取决于退化的阶段,也取决于治理的难易程度,例如对森林恢复技术成本的评估表明,其成本变化在 300—8890 美元之间,退化越严重,治理成本越大^[50-52]。此外,扶贫也被纳入生态治理效果评价的目标范围,因为在全球范围内,居住在退化土地的一般以贫困人口为主^[42]。利益相关者的参与在生态治理和恢复中起着至关重要的作用,研究表明,缺乏政策的革新(如土地确权)和当地民众的参与,生态恢复工程则不可能成功^[18,50]。

针对典型脆弱生态区退化生态系统治理技术,其评价的方法主要包括建立技术文档、确定评价指标、构建评价方法和模型等方面的内容。

(1)建立技术文档:对所评价的生态技术本身有个全面的了解。主要包括技术定义、技术原理、作用部位、工艺描述、技术标准、实施流程、治理周期、参考成本、技术应用(适用退化类型、应用区域范围、应用案例等);技术的研发、使用、成熟等时间节点,是长效的还是临时的,等等。由于技术应用以单项技术、技术模式等形式存在,需要研制相应的技术模板或表式结构,对技术的详细情况有简明扼要的刻画,以便研究人员和用户参考使用。

(2)确定评价指标:分层分级建立指标体系,是生态技术评价的基本思路。一般而言,建立三级评价指标可以兼顾不同层面的技术,实现从粗评估到细评估、从广泛评估到深入评估的递进式评估的目的。其中,一级指标应当具有简单易用、省时、成本低、便于比较等特点,可以用于对所有技术的评价。主要指标涵盖技术成熟度、有效性、适宜性、应用难度、推广潜力等 5 个方面(图 1)。二级指标是对一级指标的细化,适用于对优选的生态技术的评价,每个一级指标下均可建立相应的、最少数量的二级指标。在生态技术评价中,二级指标可以由包括一级指标体系下五类共 15 个指标组成(图 1)。三级指标适用于对优选的核心关键技术进行定量评价,其指标的选择可以根据实际的评估技术设定。在对具体的生态技术做定量评价时,指标体系中的三级指

标选择可以存在差异,但不可以缺项,即每个二级指标下面需要有对应的三级指标^[38,53-54],以便能够比较全面地描述所评价技术的优、劣及其具体表现的方面。

(3)构建评价方法和模型:针对建立的评价指标体系,采用三阶段评估的方法(Three Phase Evaluation Method, THEM),循序渐进、由定性到定量对生态技术进行评价。第一阶段即定性评估法(快速评估法)是基于全球平均水平的对技术本身的一般评价,是适用于所有生态技术的、针对一级指标的通用评价方法。定性评价法不是一种资料收集的方法论,而是一个创造性的快速了解过程^[55]。通过设定选择项,对技术的优劣进行快速评价,形成优选技术清单(图1)。第二阶段即半定量评价法是在定性评价的基础上,对优选技术进行更加细致的评价。通过赋予每个二级指标分值、不同的利益相关方进行打分,然后计算每项指标的平均得分来对每一项生态技术予以评价,比较不同生态治理技术之间的优劣,形成优选的核心关键技术清单(图1)。第三阶段即定量评价法主要针对优选的核心关键技术,利用三级指标开展的评价。要求对评价技术的实施时间和空间进行确定,有相应的生态技术实施后的生态、经济和社会统计或监测数据。必须是由特定计算模型/公式计算出的带有数量单位的具体数值结果,且需要进行去量纲化处理,最后根据去量纲化的数值(结果值)和指标权重,计算每项技术得分,进而对技术的优劣进行评价,形成可推荐的技术方案(图1)。因此,THEM法能够支持定性和定量评估,从而满足不同需求的技术评估。

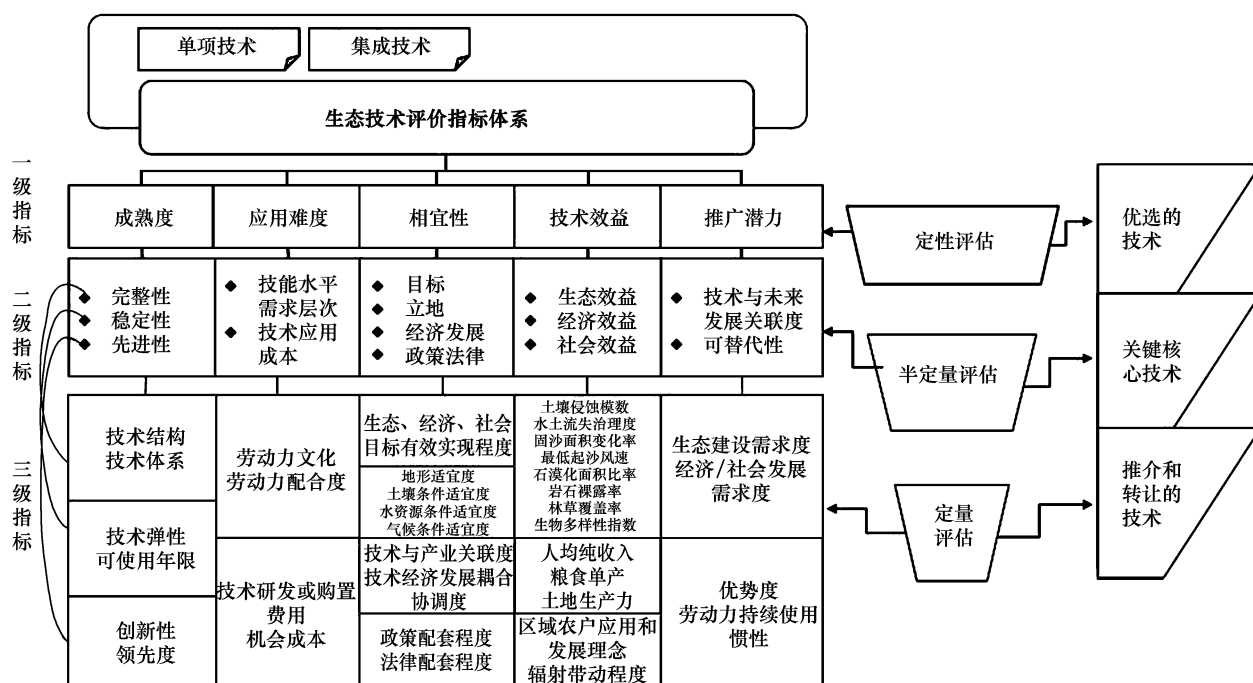


图1 生态技术的三阶段评估方法

Fig.1 Three Phase Evaluation Method (THEM) for Ecological Restoration Technology

3 生态技术评价方法及其应用研究

本专栏刊登的14篇学术文章,从评价方法和模型、案例应用等方面对生态技术展开了研究,以期为我国及全球生态治理提供参考。其中,方法模型研究主要针对生态技术评价中缺乏普遍认可的方法和模型问题,构建了能够揭示生态治理技术本身属性、相宜性、应用效果、推广潜力等的生态技术综合评价指标体系^[56-57],并在典型流域开展水土保持技术评价及相关应用^[58-59];技术效果及影响研究关注不同生态功能区的生态效益^[60-62]和社会经济效益^[63-64],为区域生态、经济和社会的协调发展提供参考;不同空间尺度的研究涉及全国生态退化问题识别^[65]、生态技术需求评估^[66]和三生空间冲突格局^[67]等,为生态治理决策和利益相关者参与

提供依据;最后,就国内外生态问题产生根源和生态治理经验进行讨论^[68-69],系统地总结了生态治理的有效途径和技术配置原则。

参考文献 (References):

- [1] MA. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Policy Response, Findings of the Responses Working Group. Washington D C; Island Press.
- [2] UNEP. 2014. UNEP Yearbook 2014: Emerging Issues in Our Global Environment. Nairobi; UNEP.
- [3] Lal R, Lorenz K, Hüttl R F, Schneider B U, von Braun, J. Recarbonization of the Biosphere: Ecosystems and the Global Carbon Cycle. Dordrecht; Springer Netherland, 2012.
- [4] United Nations. The Sustainable Development Goals Report 2018. New York; United Nations. 2018.
- [5] UNDP. UNDP in Focus 2014/2015—Time for Global Action. New York; UNDP. 2015.
- [6] 国家发展和改革委员会. 全国主体功能区规划. 北京:人民出版社,2015.
- [7] 国家林业和草原局. 第五次全国荒漠化和沙化公报[R]. 北京:国家林业和草原局,2015.12.29. <http://www.forestry.gov.cn/main/225/content-846955.html>
- [8] 程国栋.中国西部生态修复试验示范研究集成.北京:科学出版社,2012.
- [9] 王继军,姜志德,连坡,郭满才,姜峻,苏鑫,李慧,牛艳丽. 70年来陕西省纸坊沟流域农业生态经济系统耦合态势. 生态学报, 2009, 29(9): 5130-5137.
- [10] 傅伯杰,刘国华,欧阳志云. 中国生态区划研究. 北京:科学出版社,2013.
- [11] Cairns J. The recover process in damaged ecosystems. Ann Arbor; Ann Arbor Science Publishers, 1980.
- [12] Lane L J, Nearing M A. USDA-Water Erosion Prediction Project; hillslope profile model documentation[R]. Washington D C; National Soil Erosion Research Laboratory.1989.
- [13] 托马斯·海贝斯,迪特·格鲁诺,李慧斌. 中国与德国的环境治理. 北京:中央编译出版社,2012.
- [14] Jacobs D F, Dalgleish H J, Nelson C D. A conceptual framework for restoration of threatened plants; the effective model of American chestnut (*Castanea dentata*) reintroduction. New Phytologist, 2012, 197(2):378-393.
- [15] Weeks A R, Sgro C M, Young A G, Frankham R, Mitchell N J, Miller K A, Byrne M, Coates D J, Eldridge M D B, Sunnucks P, Breed M K, James E A, Hoffmann A A. Assessing the benefits and risks of translocations in changing environments: a genetic perspective. Evolutionary Applications, 2011, 4(6):709-725.
- [16] Bullock J M, Aronson J, Newton A C, Pywell R F, Rey-Benayas J M. Restoration of ecosystem services and biodiversity: conflicts and opportunities. Trends in Ecology & Evolution, 2011, 26(10):541-549.
- [17] William J. Soils Governance in Australia: challenges of cooperative federalism. International Journal of Rural Law and Policy, 2015,1,1-12.
- [18] UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). Sustainable Land Management Contribution to Successful Landbased Climate Change Adaptation and Mitigation[M]. Paris;UNCCD, 2017.
- [19] 资源环境领域技术预测工作研究组(ETFGC). 国内外资源环境领域技术竞争力综合报告[R]. 北京:国内外资源环境领域技术竞争力综合报告, 2015.
- [20] 科学技术部. 生态保护科技创新十年巡礼. 北京:科学技术部,2012.
- [21] 甄霖,王继军,姜志德,刘孝盈,张长印,马建霞,肖玉,谢永生,谢高地. 生态技术评价方法及全球生态治理技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7152-7157.
- [22] 甄霖,胡云锋,魏云洁,罗琦,韩月琪. 典型脆弱生态区生态退化趋势与治理技术需求分析. 资源科学, 2019, 41(1): 63-74.
- [23] 徐国劲,谢永生,骆汉,孟敏. 重大生态工程规划设计的理论探讨. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1139-1151.
- [24] 李阔,许吟隆. 适应气候变化技术识别标准研究. 科技导报, 2015, 33(16): 95-101.
- [25] 吕燕,杨发明. 有关生态技术概念的探讨. 生态经济, 1997(3): 45.
- [26] 代富强,刘刚才. 紫色土丘陵区典型水土保持措施的适宜性评价. 中国水土保持科学, 2011, 9(4): 23-30.
- [27] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,谢云. 中国水土保持措施分类. 水土保持学报, 2013, 27(2): 80-84.
- [28] 张海元. 甘肃河西走廊绿洲的荒漠化及治理对策. 甘肃农业, 2001(2): 27-29.
- [29] 张克斌,王锦林,侯瑞萍,李瑞,杨晓晖. 我国农牧交错区土地退化研究——以宁夏盐池县为例. 中国水土保持科学, 2003(1): 85-90.
- [30] 何京丽. 北方典型草原水土保持生态修复技术. 水土保持研究, 2004(3): 299-301.
- [31] 王立明,杜纪山. 岷山区域植物多样性及其与生境关系分析. 四川林业科技, 2004(3): 22-26.
- [32] 谢永生,李占斌,王继军,姜志德. 黄土高原水土流失治理模式的层次结构及其演变. 水土保持学报, 2011, 25(3): 211-214.
- [33] 陈亚宁. 干旱荒漠区生态系统与可持续管理. 北京:科学出版社,2009.
- [34] Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration; [www. ser. org](http://www.ser.org) & Tucson; Society for Ecological Restoration International.
- [https://www.ctahr.hawaii.edu/littonc/PDFs/682_SERPrimer. pdf](https://www.ctahr.hawaii.edu/littonc/PDFs/682_SERPrimer.pdf)
- [35] Hobbs R J, Norton D A. Towards a conceptual framework for restoration ecology. Restoration Ecology, 1996,4(2):93-110.
- [36] Hobbs R J, Harris J A. Restoration Ecology: Repairing the Earth's Ecosystems in the New Millennium. Restoration Ecology, 2001, 9(2):239-246.

- [37] Higgs E S. What is good ecological restoration? *Conservation Biology*, 1997, 11 (2): 338-348.
- [38] Zhen L, Yan H M, Hu Y F, Xue Z C, Xiao Y, Xie G D, Ma J X, Wang J J. Overview of Ecological Restoration Technologies and Evaluation Systems. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(04): 315-324.
- [39] Hobbs R J. Degraded or just different? Perceptions and value judgements in restoration decisions. *Restoration Ecology*, 2016, 24(2): 153-158.
- [40] GRZ (Government of the Republic of Zambia). Technology Needs Assessment for Climate Change Adaptation: Barrier Analysis and Enabling Framework Report. RuralNet Associates Limited, Lusaka. 2013.
- [41] UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). Land Degradation Neutrality: Transformative action, tapping opportunities. Bonn, Germany, 2016.
- [42] UNDP. Handbook for Conducting Technology Needs Assessment for Climate Change. New York: UNDP. 2010. http://unfccc.int/ttclear/misc/_StaticFiles/gnwoerk_static/TNR_HAB/b87e917d96e94034bd7ec936e9c6a97a/1529e639caec4b53a4945ce009921053.pdf
- [43] IUCN (International Union for Conservation of Nature). The IUCN red list of threatened species. Switzerland: IUCN, 2015.
- [44] Dale V H, and Beyeler S C. Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological indicators*, 2001, 1(1): 3-10.
- [45] Zhen L, and Routray J K. Operational indicators for measuring agricultural sustainability in developing countries. *Environmental Management*, 2003, 32(1): 34-46.
- [46] Zhen L, Routray J K, Zoebisch M A, Chen G B, Xie G D, Cheng S K. Three dimensions of sustainability of farming practices in the North China Plain: a case study from Ningjin County of Shandong Province, PR China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105(3): 507-522.
- [47] Zhen L, Xie G, Yang L, Cheng S K. Land use dynamics, farmers' preferences and policy implications in the Jinghe watershed of remote north-western China. *Outlook on Agriculture*, 2007, 36(2): 127-135.
- [48] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2014: Synthesis Report. Switzerland: IPCC, Geneva. 2014.
- [49] 虞晓芳, 龚建立, 张化尧. 技术经济学概论. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [50] Appanah S. Forest landscape restoration for Asia-Pacific forests - a synthesis. Bangkok, FAO Regional Office for Asia and the Pacific and RECOFTC. 2016.
- [51] Elliott S D, Blakesley D, Hardwick K. restoring tropical forests a practical guide. London: Royal Bontanic Gardens, Kew. 2013.
- [52] Nawir A A, Gunarso P, Santoso H, Julmansyah, Hakim M R. Experience, lessons and future directions for forest landscape restoration in Indonesia. Bangkok, FAO Regional Office for Asia and the Pacific and RECOFTC. 2016.
- [53] Luo H, Xie Y, Lv J. Effectiveness of soil and water conservation associated with a natural gas pipeline construction project in China. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(7): 768-776.
- [54] 乔梅, 王继军, 李玥, 赵晓翠. 水土保持技术选择的主要驱动要素分析. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 132-138.
- [55] 艾尔·巴比, 邱泽奇. 社会研究方法. 北京: 华夏出版社, 2005.
- [56] 骆汉, 胡小宁, 谢永生, 王继军, 郭满才. 生态治理技术评价指标体系. *生态学报*, 2019, 39(16): 5766-5777.
- [57] 丁新辉, 刘孝盈, 刘广全, 朱毕生, 王炜炜. 京津风沙源区沙障固沙技术评价指标体系构建. *生态学报*, 2019, 39(16): 5778-5786.
- [58] 乔梅, 王继军, 赵晓翠, 李玥, 韩晓佳. 基于评价指标为潜变量背景下的纸坊沟流域水土保持技术评估. *生态学报*, 2019, 39(16): 5787-5797.
- [59] 赵晓翠, 王继军, 乔梅, 韩晓佳, 李玥. 水土保持技术对农业产业-资源系统的耦合路径分析. *生态学报*, 2019, 39(16): 5820-5828
- [60] 肖玉, 谢高地, 甄霖, 徐洁, 王洋洋. 三北工程黄土高原丘陵沟壑区森林降温增湿效果研究. *生态学报*, 2019, 39(16): 5836-5846.
- [61] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 甄霖. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局与变化研究. *生态学报*, 2019, 39(16): 5847-5856.
- [62] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 王洋洋, 江源, 陈文辉. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别. *生态学报*, 2019, 39(16): 5857-5873.
- [63] 杨婉妮, 甄霖. 不同生态恢复措施对草地样带食物消费的影响研究——以锡林郭勒盟为例. *生态学报*, 2019, 39(16): 5885-5896.
- [64] 甘爽, 肖玉, 徐洁, 王洋洋, 余付勤, 谢高地. 呼伦贝尔草原草甸生态功能区建设的费用效益综合评价. *生态学报*, 2019, 39(16): 5874-5884.
- [65] 胡云锋, 韩月琪, 曹巍. 中国水土流失研究热点区的空间分布. *生态学报*, 2019, 39(16): 5829-5835.
- [66] 魏云洁, 甄霖, 胡云锋, 肖玉. 黄土高原典型区水土保持技术评估与需求分析——以安塞为例. *生态学报*, 2019, 39(16): 5809-5819.
- [67] 赵旭, 汤峰, 张蓬涛, 胡波洋, 徐磊. 基于 CLUE-S 模型的县域生产-生活-生态空间冲突动态模拟及特征分析. *生态学报*, 2019, 39(16): 5897-5908.
- [68] 徐国劲, 谢永生, 骆汉. 生态问题的经济社会根源与治理对策研究——以美国“黑风暴”事件为例. *生态学报*, 2019, 39(16): 5755-5765.
- [69] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 胡云锋. 西南岩溶地区石漠化综合治理经验与做法. *生态学报*, 2019, 39(16): 5798-5808.